

# 中國醫藥大學

碩士論文

編號：DOSH-0605

不同控制技術下重型柴油引擎尾氣中次微米  
懸浮微粒之數量排放特性與減量效率

*Submicrometer Particle Number Emission  
Characteristics and Reduction Efficiency of  
Heavy-Duty Diesel Engine Equipped with  
Selected Control Technologies*

所別：職業安全與衛生學系碩士班

指導教授：楊禮豪 *Li-Hao Young*

賴俊雄 *Jim-Shoung Lai*

學生：劉怡均 *Yi-Jyun Liou*

學號：9872005

中華民國 100 年 06 月

中國醫藥大學碩士班研究生  
論文指導教授推薦書

職業安全與衛生學系碩士班，劉怡均君所提之論文

不同控制技術下重型柴油引擎尾氣中次微米懸浮微粒之

數量排放特性與減量效率 係由本人指導撰述，同意提付

審查。

楊禮豪  
指導教授 賴俊維

中 華 民 國 100 年 0 月 9 日

中國醫藥大學碩士班研究生  
論文口試委員審定書

職業安全與衛生學系碩士班，劉怡均君所提之論文

不同控制技術下重型柴油引擎尾氣中次微米懸浮微粒之  
數量排放特性與減量效率

經本委員會審議，符合本校碩士資格標準。

論文口試委員會 委員 鄭子序  
賴俊雄  
楊禮豪  
賴金龍  
系主任 趙克方

中華民國 1 0 0 年 6 月 2 7 日

## 致謝

兩年前，對於實驗研究一翹不通的我，當時憑藉著一股傻勁，一頭栽入研究所當中。然而，經過了兩年，我得到的不單只是一張文憑，而是在各方面的成長，都是我在兩年前未能預料的。感謝系上各位老師在專業領域上的教導，讓我在論文研究期間具有相當之基礎已完成研究。

論文口試期間，承蒙鄭曼婷老師及賴全裕老師在百忙中，給予詳細的審閱與指正，並提供許多寶貴的經驗及意見，讓學生論文得以更加豐富與嚴謹，在此致上我最誠摯的感謝。

論文研究期間，亦要感謝中國石油煉製所高水興先生及環保署/國科會空污防治科研合作計畫中鄭曼婷老師、楊錫賢老師、蔡瀛逸老師、王琳麒老師與盧昭輝老師在每次採樣與開會之指導與經驗傳授；以及政琦、盈仲、勳融、景良、智偉、慶晟與彥甫在採樣時的幫忙與陪伴，讓我在愉快的氣氛下完成每次的採樣。

在研究所兩年間，感謝許多學長姐不厭其煩教導我各方面事物與經驗傳授，還有金旻、雅惠、映蓉、志豪、育賢、宜珍、伸恩與傑安各位革命情感同學的相伴，使得碩士生活處處充滿歡樂。還要感謝研究室中顛婷學姊、弘杰學長、敬惠、盈仲、維倫、昀樺、珮瑄和庭緯，在各方面的指導、勉勵及幫助。

最要感謝的則為指導老師，首先是賴俊雄老師總是非常帥氣，無時

無刻精神充沛，一眼就能看出問題並提出相當有趣的見解，彌補我沒注意到的關鍵問題，再次衷心感謝賴副的指導。再者為楊禮豪老師，對於研究上的指導不在話下，還有平常生活言行待人處事以及面對事情的思考態度與處理方式，更勝於我在研究中獲得的知識，為受用一生的智慧，對此再次由衷的感謝老師的指導還有對於學生論文細心的修正。

最後感謝我的家人對我的支持，讓我無後顧之憂的完成學業，還有姊姊在生活中各方面的幫忙，以及馨慧與佩芷在台中的陪伴，讓我感到無比的溫暖。

感謝「環保署/國科會空污防制科研合作計畫」

NSC98-EPA-M-003-002，柴油車細懸浮微粒排放推估與減量技術之研究

NSC-99-EPA-M-002-002，柴油車細懸浮微粒(PM2.5)排放減量技術及策略之研究。

氣膠物理化學研究室

劉怡均 100.7.22

## 摘要

柴油引擎為現代重型運輸工具與工業機具設備之主要動力來源；然而，柴油引擎尾氣對人體健康與環境衛生有顯著之不良效應。有鑑於此，本研究旨在探討重型柴油引擎尾氣中之次微米(10-1000 nm)懸浮微粒數量濃度及粒徑分布特性，並評估不同引擎操作條件與控制技術之微粒數量減量效率。受測之條件與技術包括不同負載(扭力)與轉速、油品及尾氣處理設備，而動力計模擬之引擎運轉型態包括惰轉、低、中與高負載等四種穩態及美國暫態循環。採樣系統乃於旋轉盤熱稀釋系統與定容積稀釋系統中，使用掃描式電移動度分徑儀與凝結核計數器(SMPS+C)，量測引擎尾氣中之次微米微粒數量濃度粒徑分布。結果顯示，惰轉受揮發性物質影響最大，故其數量濃度粒徑分布與其它條件相當不同。其餘引擎操作條件，數量濃度隨著負載與轉速增加而增高；波峰眾數粒徑隨扭力增加而增大，但隨轉速增加而減小，且此趨勢不受油品種類影響。相較於市售低硫柴油，無論何種負載之數量濃度隨生質柴油中廢食用油添加比例增加或含硫量減少而降低，但其粒徑分布則受油品影響甚小。不論何種油品與負載，氧化觸媒濾煙器對微粒數量具99%以上之減量效率，且不改變原始粒徑分布。本研究結果預期有助重型柴油引擎尾氣排放之管制策略擬定，及柴油引擎尾氣中微粒數量檢測之技術規範建立。



關鍵字：重型柴油引擎、次微米微粒、數量濃度粒徑分布、控制技術、  
減量效率



## Abstract

Diesel engine has been widely used in modern heavy-duty vehicles and nonroad equipments; however, diesel engine exhaust has significant impact on human and environmental health. With that in mind, the objectives of this study are to characterize the submicrometer particle (10-1000 nm) number size distributions in heavy-duty engine exhaust, and to examine the number reduction efficiency with various engine operations and control technologies. Test conditions include various fuel types, aftertreatments and driving conditions. A dynamometer was used to simulate various driving conditions, such as the US transient cycle and steady-state idle, low, medium, and high engine load (torque) and speed. A sequential mobility particle sizer and condensation particle counter (SMPS+C) system was used to measure the number-size distributions of submicrometer particles with a rotating disk thermodiluter and a constant volume sampling system. The results show that the number emission characteristics at idle are strongly affected by semivolatile materials, and hence differ from other engine operations. For each fuel, the particle number concentration increases with increasing load and speed, whereas the mode diameter increases with increasing load and decreasing speed. For each engine load and with respect to regular diesel, the particle number concentration decreases with increasing waste cooking oil biodiesel blends or decreasing sulfur content. The test fuels have negligible effects on the size distribution. For all test operations and fuels, the diesel oxidation catalyst with diesel particulate filter (DOC+DPF) shows number reduction efficiencies of over 99%, and the resulting size distribution is similar to that without the aftertreatment. The outputs of the present study are



expected to contribute to the development of diesel engine control strategy and particle number measurement techniques.

Keywords: Heavy-duty diesel engine, submicrometer particle, number size distribution, control technology, reduction efficiency



## 目錄

致謝 .....	I
摘要 .....	III
Abstract .....	V
目錄 .....	VII
表目錄 .....	XI
圖目錄 .....	XIII
第一章 緒論 .....	1
1.1 研究緣起 .....	1
1.2 研究目的 .....	3
第二章 文獻回顧 .....	4
2.1 柴油車特性與應用 .....	4
2.2 柴油引擎對環境與健康之影響 .....	6
2.2.1 柴油引擎尾氣與台灣空氣品質 .....	6
2.2.2 柴油引擎尾氣與公共衛生 .....	8
2.3 柴油引擎微粒之特性 .....	14
2.3.1 柴油引擎微粒生成機制與化學組成 .....	14
2.3.2 揮發性物質之影響 .....	16
2.3.3 引擎負載與轉速之影響：動力計試驗 .....	18

2.4 柴油引擎使用之油品.....	24
2.4.1 柴油中含硫量之影響.....	24
2.4.2 生質柴油之影響.....	25
2.5 柴油引擎微粒之控制技術.....	29
2.6 法規排放標準與國際趨勢.....	33
第三章 研究材料與方法.....	52
3.1 研究架構.....	52
3.2 受測引擎與控制技術.....	54
3.2.1 引擎規格.....	54
3.2.2 受測油品性質.....	55
3.2.3 尾氣後處理設備規格.....	56
3.3 引擎操作條件.....	58
3.3.1 穩態測試條件.....	59
3.3.2 美國暫態測試條件.....	61
3.4 引擎尾氣採樣稀釋系統.....	63
3.4.1 旋轉盤熱稀釋系統.....	63
3.4.2 定容積稀釋系統.....	65
3.5 微粒數量濃度粒徑分布量測儀器.....	67
3.6 資料分析.....	69

3.7 品保品管.....	73
3.7.1 例行維護與保養.....	73
3.7.2 採樣系統微粒損失率計算.....	75
3.7.3 量測再現性測試.....	77
3.7.4 稀釋比例測試.....	79
第四章 結果與討論.....	107
4.1 微粒相之半揮發性物質.....	107
4.2 穩態測試：旋轉盤熱稀釋系統.....	109
4.2.1 不同負載測試.....	109
4.2.2 不同油品測試.....	115
4.2.3 不同尾氣後處理設備測試.....	121
4.2.4 氧化觸媒濾煙器再生過程之數量排放特性.....	135
4.3 穩態測試：定容積稀釋系統.....	138
4.3.1 次微米微粒數量排放濃度與係數.....	138
4.3.2 次微米微粒數量排放係數粒徑分布.....	139
4.4 美國暫態循環測試.....	141
4.4.1 次微米微粒數量排放係數與濃度.....	141
4.4.2 次微米微粒數量排放係數粒徑分布.....	145
4.4.3 美國暫態循環逐秒微粒數量排放係數.....	148

第五章 結論.....	186
5.1 研究結論.....	186
5.2 研究限制.....	187
5.3 建議.....	188
參考文獻.....	190



## 表目錄

表 2-1 固定與移動污染源對不同污染物貢獻百分比 .....	35
表 2-2 在移動污染源中柴油車對不同污染物貢獻百分比 .....	35
表 2-3 我國與先進國家重型柴油引擎排放標準 .....	36
表 2-4 先進國家重型柴油引擎之微粒數量排放係數 .....	37
表 3-1 研究期程.....	81
表 3-2 測試參數.....	82
表 3-3 引擎規格.....	83
表 3-4 油品物理化學特性 .....	84
表 3-5 濾煙器規格.....	85
表 3-6 濾煙器化學組成百分比 .....	86
表 3-7 歐洲穩態測試引擎操作參數(旋轉盤熱稀釋系統).....	86
表 3-8 穩態測試操作參數(定容積稀釋系統).....	87
表 3-9 旋轉盤熱稀釋系統各採樣條件下稀釋比 .....	88
表 3-10 CVS 採樣稀釋系統各採樣條件下稀釋比.....	89
表 3-11 不同粒徑微粒於旋轉盤熱稀釋系統管線中之傳輸效率理論值計 算.....	90
表 3-12 不同粒徑微粒於採樣管線中之傳輸效率理論值計算 .....	90
表 3-13 美國暫態循環同一引擎測試條件下，微粒數量濃度樣本數與組	



內相對標準偏差.....	91
表 3-14 同一引擎測試條件下，當天重複量測所獲得微粒數量濃度之組	
內相對標準偏差.....	91
表 4-1 樣本加熱與否對微粒數量濃度之影響.....	151
表 4-2 未裝設尾氣後處理設備在不同條件下負載數量濃度之比較.....	152
表 4-3 裝設尾氣後處理設備在不同條件下負載數量濃度之比較.....	153
表 4-4 不同比例生質柴油在不同負載下氧化觸媒濾煙器裝設與否微粒數	
量濃度.....	154
表 4-5 濾煙器與新氧化觸媒濾煙器之引擎排放微粒數量濃度.....	154
表 4-6 穩態測試下不同轉速之次微米微粒數量濃度與係數表( $10^8$ #/cm <sup>3</sup> )	
.....	155
表 4-7 美國暫態循環測試下五種測試條件之次微米微粒數量排放係數	
與濃度總表( $10^{13}$ #/bhp-hr).....	156
表 4-8 引擎速度及扭力與數量排放係數迴歸.....	157

## 圖目錄

圖 2-1 不同粒徑微粒沉積於呼吸道百分比 .....	38
圖 2-2 柴油引擎尾氣中懸浮微粒粒徑分布圖 .....	38
圖 2-3 柴油引擎尾氣粒狀污染物組成圖 .....	39
圖 2-4 不同操作條件下尾氣樣本加熱與否微粒數量濃度粒徑分布 (a)1590 rpm/949 Nm (b)1490 rpm/273 Nm (樣本加熱溫度 270°C).....	39
圖 2-5 使用不同含硫量(1 到 325 ppm)柴油在不同操作條件下為粒數量濃度粒徑分布 (a)惰轉 (b)輕中型負載 (c)輕負載 (d)重負載 (TD 為樣本加熱至 300 °C) (Kittelson et al., 2006) .....	40
圖 2-6 不同負載之數量濃度粒徑分布 .....	40
圖 2-7 引擎在固定 1400 rpm 下不同負載之微粒數量濃度粒徑分布 .....	41
圖 2-8 不同負載引擎尾氣中微粒數量粒徑分布 (上圖)100%負載 (下圖)50%負載 .....	42
圖 2-9 使用不同引擎在 100 與 25%負載下微粒數量濃度粒徑分布 .....	43
圖 2-10 使用不同引擎在 100 與 25%負載下微粒數量濃度 .....	43
圖 2-11 使用一般市售超級柴油(certified)與低硫柴油(BP15)在各操作條件下數量濃度粒徑分布 (a)加速 (b)減速 (c)定速 (d)惰轉 .....	44
圖 2-12 Minnesota 高速公路上不同車速之數量濃度與體積粒徑分布 .....	45
圖 2-13 使用不同引擎在歐洲暫態循環下微粒數量粒徑分布 .....	46

圖 2-14 含硫量 50 ppmv 和 15 ppmv 之微粒數量濃度粒徑分布 .....	46
圖 2-15 使用一般柴油與不同比例、材料之生質柴油數量濃度 .....	47
圖 2-16 一般市售柴油與生質柴油引擎排放之微粒數量濃度粒徑分布 ..	47
圖 2-17 超低硫柴油與添加不同比例生質柴油在低負載(0.2 MPa)之微粒 數量濃度粒徑分布 .....	48
圖 2-18 氧化觸媒.....	49
圖 2-19 濾煙器 (Majewski, 2001).....	49
圖 2-20 濾芯材料捕集原理 .....	50
圖 2-21 使用不同後處理設備之微粒數量濃度粒徑分布 .....	50
圖 2-22 使用 DOC 與 DOC+DPF 之微粒數量濃度粒徑分布 .....	51
圖 2-23 不同油品在各粒徑下裝配 DOC 和 CPF 之微粒數量濃度.....	51
圖 3-1 研究計畫整體架構 .....	92
圖 3-2 研究方法.....	93
圖 3-3 濾煙器照片 (a) 濾煙器平面圖 (b) 實際照片 (c) DOC (d) DPF .	94
圖 3-4 歐洲穩態循環.....	95
圖 3-5 美國暫態循環測試曲線 .....	95
圖 3-6 旋轉盤熱稀釋系統示意圖 .....	96
圖 3-7 旋轉盤熱稀釋系統儀器實際圖 .....	97
圖 3-8 旋轉盤稀釋氣原理圖 .....	97

圖 3-9 旋轉盤樣本盤 (10 盤).....	98
圖 3-10 旋轉盤稀釋系統實際採樣圖 .....	98
圖 3-11 定容積採樣系統示意圖.....	99
圖 3-12 外加稀釋道 (上圖)示意圖 (下圖)實際採樣圖 .....	100
圖 3-13 SMPS+C 圖 (a)構造示意圖 (b)儀器實際圖 .....	101
圖 3-14 採樣系統 QA/QC 架構.....	102
圖 3-15 採樣系統之擴散與重力微粒損失百分比: (a)定容積採樣系統 (b) 旋轉盤熱稀釋系統之損失.....	103
圖 3-16 同一引擎測試條件下，不同天量測所獲得微粒數量濃度之組間 相對標準偏差.....	104
圖 3-17 同一引擎測試條件下不同天採樣之粒徑分布再現性測試(a)負載 25% (b)負 50%下使用一般市售超級柴油未裝設尾氣後處理設備 .	105
圖 3-18 不同稀釋倍數對微粒數量濃度與粒徑分布之影響(a)數量濃度(b) 粒徑分布(未調整稀釋倍數).....	106
圖 4-1 樣本加熱與否對微粒數量濃度粒徑分布之影響 (a) 0%負載 (b) 50%負載.....	158
圖 4-2 使用一般市售超級柴油(B2)在不同引擎負載下未裝設尾氣後處理 設備之微粒數量濃度.....	159
圖 4-3 使用一般市售超級柴油(B2) 在不同引擎負載下裝設濾煙器之微	

粒數量濃度.....	160
圖 4-4 使用一般市售超級柴油(B2) 在不同引擎負載下裝設新氧化觸媒 濾煙器之微粒數量濃度.....	160
圖 4-5 不同比例生質柴油在不同引擎負載下未裝設尾氣後處理設備之微 粒數量濃度粒徑分布 (a)市售 B2 柴油 (b)10%生質柴油 (c)20%生質 柴油.....	162
圖 4-6 裝設尾氣後處理設備在不同引擎負載之微粒數量濃度粒徑分布 (a) 氧化觸媒濾煙器 (b)濾煙器 (c)新氧化觸媒濾煙器 .....	163
圖 4-7 在相同負載下使用不同比例生質柴油之微粒數量濃度 .....	164
圖 4-8 在相同負載下使用不同比例生質柴油之微粒數量濃度減量效率	164
圖 4-9 不同比例生質柴油之微粒加權平均數量濃度 .....	165
圖 4-10 在相同負載下使用不同比例生質柴油之微粒數量濃度粒徑分布 (a)0% (b)25% (c)50% 負載.....	166
圖 4-11 不同比例生質柴油之微粒加權平均數量濃度粒徑分布 .....	167
圖 4-12 不同比例生質柴油不同負載下裝設氧化觸媒濾煙器(DOC+DPF) 對引擎尾氣中微粒數量濃度減量效率.....	167
圖 4-13 濾煙器與氧化觸媒濾煙器對引擎尾氣中微粒數量濃度減量效率	168
圖 4-14 引擎尾氣微粒數量濃度與裝設尾氣後處理設備之加權平均數量 濃度減量效率.....	168



圖 4-15 使用一般市售超級柴油(B2)在不同負載下是否裝設氧化觸媒濾煙器之微粒數量濃度粒徑分布 (a)0% (b)25% (c)50% 負載.....	169
圖 4-16 使用一般市售超級柴油(B2)在 0% 負載操作下尾氣中微粒數量濃度經過 DOC+DPF 之減量效率粒徑分布.....	170
圖 4-17 使用不同比例生質柴油是否裝設氧化觸媒濾煙器之微粒加權數量濃度粒徑分布 (a)B2_S50 (b)B10 (c)B20 油品.....	171
圖 4-18 使用一般市售超級柴油(B2)在不同負載下是否裝設濾煙器之微粒數量濃度粒徑分布 (a)0% (b)25% (c)50% (d)75% 負載.....	173
圖 4-19 使用一般市售超級柴油(B2)在不同負載操作下尾氣中微粒數量濃度裝設 DPF 之減量效率粒徑分布 (a)50 (b)75% 負載.....	174
圖 4-20 使用一般市售超級柴油(B2)裝設濾煙器與否之微粒加權數量濃度粒徑分布 .....	174
圖 4-21 使用一般市售超級柴油(B2)在不同負載下是否裝設新氧化觸媒濾煙器之微粒數量濃度粒徑分布 (a)0% (b)25% (c)50% (d)75% 負載.....	176
圖 4-22 一般市售超級柴油(B2)在 75% 負載操作下尾氣中微粒數量濃度裝設 DOC+DPF <sub>n</sub> 之減量效率粒徑分布 .....	176
圖 4-23 裝設新氧化觸媒濾煙器與否之微粒加權數量濃度粒徑分布 ....	177
圖 4-24 尾氣後處理設備不同粒徑減量效率 (a)DOC+DPF (b)DPF (c)DOC+DPF <sub>n</sub> .....	178



圖 4-25 DOC+DPF 再生過程逐秒微粒數量濃度排放 .....	179
圖 4-26 DOC+DPF 再生過程中逐秒排氣溫度變化 .....	179
圖 4-27 DOC+DPF 再生前、中及後之微粒數量濃度 .....	180
圖 4-28 定容積稀釋系統中不同轉速穩態測試下次微米微粒數量濃度	180
圖 4-29 定容積稀釋系統中不同轉速穩態測試下之次微米微粒數量濃度 粒徑分布 .....	181
圖 4-30 暫態循環下不同油品及後處理設備五種測試條件之次微米微粒 數量加權排放係數與減量效率(以 B1_S50 為基準).....	181
圖 4-31 暫態循環下五種測試條件之次微米微粒數量排放係數粒徑分布： (a)使用不同油品；(b)加裝尾氣後處理設備；B1+DPF 因排放係數遠 低於其他操作條件，故其座標另置於右方縱軸.....	182
圖 4-32 氧化觸媒濾煙器於暫態循環中對不同粒徑微粒之補集效率 .....	183
圖 4-33 美國暫態循環逐秒運轉型態與使用 B10 生質柴油所排放之數量 排放係數 (a)FTP 1200 秒運轉速度百分比 (b)FTP 1200 秒運轉扭力 百分比 (c)使用 B10 逐秒所排放之數量排放係數 .....	184
圖 4-34 美國暫態循環逐運轉型態與所排放之微粒數量排放係數相關係 數分布圖 (a) 速度與排放係數 (b)扭力與排放係數 .....	185

## 第一章 緒論

### 1.1 研究緣起

由於全球大規模的經濟開發與交通發展，石化燃料成為最主要的動力來源，進而導致石油能源供應不足。在大眾運輸領域，柴油引擎具備下列幾項優點:輸出馬力大、熱效率高、耗能較少，溫室氣體排放較少，且燃料價格較低，所以柴油車擁有優良之應用發展潛力。柴油引擎主要應用於大貨車、大卡車及公路客運等大型、長程運輸工具，然而近年使用於小客車的趨勢有明顯上升。而在職業場所領域，由於工業機械設備都需要較大的輸出馬力與較低的運轉速度，所以不論在農業或工業場所隨處可見多種柴油機具的應用，例如：挖土機、堆高機、起重機等，尤其是在營造業，其柴油機具的使用上更是多樣。由上述可知，從一般大眾每天都會接觸的交通工具到勞工在職業場所裡所使用的機械設備，柴油之應用比我們想像得更貼近民眾生活。

柴油引擎具有上述的廣泛應用價值，但在健康危害與環境衛生衝擊上，卻是值得進一步探討的問題。許多研究指出，柴油引擎尾氣，包括氣態與粒狀污染物，被呼吸道吸入後，會導致急性與慢性健康效應，像是呼吸道感染、氣喘與心肺等疾病，嚴重還可能導致癌症之發生。國際癌症研究署已認定柴油引擎尾氣是人類極有可能致癌物質(Class 2A)，可看出柴油引擎尾氣對人體健康危害的衝擊。

就空氣品質而言，移動污染源為台灣空氣污染的主要來源之一，其對細懸浮微粒(PM<sub>2.5</sub>)的貢獻量為 17%。而在移動污染源中，重型柴油車對 PM<sub>2.5</sub> 貢獻量即高達 56%；若同時考量台灣人口密度每天暴露於一般大氣環境中，及柴油引擎尾氣懸浮微粒與其伴隨的氣態污染物中所含潛在高毒性化學物後，可預期柴油引擎尾氣對台灣民眾的潛在不良健康風險不容輕忽。同樣地，許多勞工亦是長時間、近距離的處在柴油引擎尾氣周遭，故其對作業勞工之健康危害更是不容小覷。

世界各國粒狀污染物之標準上，都只針對了質量進行管制，比如 TSP、PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub>；但在柴油引擎排放的尾氣中，微粒數量濃度主要貢獻者粒徑 < 100 nm 的超細微粒(ultrafine particles)。這些小粒徑之超細微粒，雖然數量上占的比例非常多，但其總質量卻是相當微小的。目前先進國家的法規中，柴油引擎排放標準都有越來越嚴格的趨勢，我國亦如此。比如粒狀污染物質量的排放標準在 2012 年將由 0.10 g/bhp-hr 大幅下修至 0.01 g/bhp-hr。此標準在質量分析上，已趨近於採樣方法與微量天秤之偵測極限。因此，歐盟現今已增訂小客貨車的微粒數量濃度排放係數管制標準，為粒狀污染物管制立下了一個新的里程碑；我國也將於 2012 年法規開始，增訂輕型柴油車微粒數量排放係數的管制，預計未來也將會針對重型柴油引擎進行修訂。此方法上之重大改變，促使柴油引擎尾氣中微粒數量排放特性是現階段迫切需要探討的。

## 1.2 研究目的

柴油引擎不論在交通運輸或是工作場所機具，其應用範圍是非常廣泛且有持續上升的趨勢。柴油引擎所排放之尾氣與一般民眾及勞工非常貼近，對健康之影響也是非常值得關注的。此外，在法規管制標準愈來愈嚴格的趨勢下，柴油引擎所排放的廢氣中微粒數量濃度為我們迫切需要瞭解的議題。我國在柴油引擎微粒數量排放特性資料極為缺乏，為了初步了解台灣地區柴油引擎數量濃度的排放特性及減量控制技術的減量效果，本研究主要目的如下：

1. 探討重型柴油引擎於動力計運轉下，不同引擎負載(扭力和轉速)、不同油品對尾氣中微粒數量濃度粒徑分布特性之影響。
2. 探討重型柴油引擎於動力計運轉下，使用不同尾氣控制設備對尾氣中微粒數量濃度粒徑分布特性之影響。
3. 評估不同引擎使用油品與控制技術對柴油引擎尾氣中微粒數量濃度之減量效率及粒徑分布特性影響。



## 第二章 文獻回顧

### 2.1 柴油車特性與應用

柴油引擎(Diesel Engine)，又名壓縮點火引擎，為德國工程師 Rudolf Diesel 在 1892 年所發明。柴油引擎運作原理為先將空氣吸入汽缸內(進器行程)，活塞再壓縮空氣(壓縮行程)，當空氣被壓縮產生高壓及高溫，並於壓縮時噴入柴油使之著火燃燒而產生能量(動力行程)，最後將燃燒產生的廢氣經由排氣閥排出(排氣過程)。柴油引擎點火系統完全靠壓縮時的高溫來點燃及燃料特性，所以在高壓縮比狀態下燃燒，其熱效率高達 35-50%，而汽油引擎僅有 30% 左右，因此柴油引擎在油耗方面比汽油引擎少。伴隨著地球暖化、氣候變遷，對於減少溫室氣體排放的議題受到重視，溫室氣體中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  主要排放源都包含化石燃料燃燒，所以柴油減少油耗即可減少能源的使用，達到節能的效果(莊志偉, 2005)。在價格方面，台灣地區 2010 年之汽油價格平均 29-31 元/公升，柴油價格平均 25-28 元/公升(經濟部能源局, 2010)相對比較下，柴油不僅油耗量少且油價也較低，從而得知柴油引擎具備的發展潛力。

柴油引擎由於上述設計原理，熱效率高、輸出馬力大、扭力輸出曲線平坦、低耗能，使得柴油車在應用上日漸增加。過去在需要大馬力且長程運輸的船舶、大貨車、大卡車或是公共汽車都是使用柴油引擎為主要的動力來源；此外我國在 2004 年加入世界貿易組織(WTO)之後，開放

柴油小客車進口，使得柴油車在台灣市場有逐漸增加的趨勢，購買使用者也愈來愈多。

除了大眾運輸工具外，柴油引擎也廣泛應用於職業場所，在農業經常使用的耕耘機、曳引機、割草機等，或是在工業、營建工地經常可見的挖土機、推高機、起重機等，抑或是交通運輸業工作者，都為在職場上隨處可見使用柴油引擎當作動力來源得機械工具，故柴油引擎在未來使用範圍將逐漸擴展。





## 2.2 柴油引擎對環境與健康之影響

由於柴油引擎之應用性廣泛，不論在職業場所勞工近距離長時間之暴露或於一般大眾每天生活之大氣環境，都是相當貼近人們的生活，其對人們影響之層面，不論在環境或是健康上是相當值得關切的議題。

### 2.2.1 柴油引擎尾氣與台灣空氣品質

空氣污染源係指排放空氣污染物之物理及化學操作單元，可廣泛分為移動污染源及固定污染源。移動污染源指因其本身動力而改變排放位置之污染源，包括車輛、火車、船舶、飛機、施工機具等；而其餘非隨動力改變污染排放位置則稱為固定污染源，包括工業煙囪排放、鍋爐等較集中固定之點源排放及較分散之固定面源，例如土木施工、道路揚塵及露天燃燒等。本研究探討之柴油引擎主要污染排放方式為移動源，依據台灣空氣污染排放清冊資料庫 TEDS7.0 中統計(TW EPA, 2010a)，空氣污染物中移動污染源占總污染源排放比例分別列於表 2-1。表中顯示，雖然移動污染源在空氣污染貢獻量大多都遠小於固定污染源，但因移動污染源不像固定污染源只在特定地區排放，其影響範圍與距離只限於該地區工作勞工與當地居民；反觀，移動污染源其排放地區不固定，一般大眾於環境中都會受到此污染源暴露，且與人體距離相當接近，再考量台灣機動車輛數目，移動污染源對一般人體暴露潛力是比較高的。針對

污染源排放比例來看，由表 2-1 中可看出移動污染源在  $\text{NO}_x$  和 CO 占總排放 54.47% 和 77.73%，其他氣態污染物也占有一定的排放量；在懸浮微粒的排放上，移動污染源在  $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_6$  及  $\text{PM}_{2.5}$  的貢獻量分別為 9.72、11.12 及 17%。表 2-2 再進一步針對移動污染源中柴油車所占的排放量來看，顯式柴油車在氣態污染物上  $\text{NO}_x$  所占的貢獻量為 64.21%；而在懸浮微粒(TSP、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_6$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ )的排放上柴油車貢獻量占了將近移動污染源總排放量的一半(TSP~ $\text{PM}_{2.5}$  的貢獻量從 43.62~56.07%)，且隨著粒徑愈小，貢獻量有愈高的趨勢。由此可知在各種移動污染源包括汽油車、機車、油電混合車及非公路運輸中，單就柴油車探討，其排放就與其他移動污染源總和相當；再將其與台灣地區機動車輛中柴油車所占比例比較，台灣地區 100 年機動車輛登記數統計，至 100 年 4 月已登記之機動車輛超過 21,874,617 輛，而柴油大貨車和大客車之車輛數則達到 191,479 輛(交通部, 2011)。顯示重型柴油車在總車輛占的比例不到 1%，但因其輸出馬力大且重量負載高，故在長程運輸和載客車輛都是使用重型柴油引擎，所以柴油車在移動污染源懸浮微粒排放上占了相當程度的貢獻量，其也顯示重型柴油車排放廢氣之高污染性對環境空氣污染有深遠的影響。

## 2.2.2 柴油引擎尾氣與公共衛生

柴油引擎尾氣(diesel engine exhaust)主要由於：(1)尾氣中微粒由非常小粒徑之微粒組成(90% < 1000 nm)，易沉積於肺部；(2)這些微粒提供非常大量接觸表面，可吸附數百種已知或疑似致癌或致突變之化學物質於微粒表面；(3)尾氣中氣態污染物包含多種刺激與毒性物質；(4)引擎在燃燒時所產生之  $\text{NO}_x$  為  $\text{O}_3$  之前驅物；(5)且由於柴油引擎廣泛應用性，除了在職業場所工作人員外，人們也會在一般大氣環境中受到交通廢氣暴露；因此，柴油引擎尾氣早在 18 世紀即受到人們的關注其對人體所造成之健康效應(Nauss, 1997)。過去柴油引擎由於排放黑煙(soot)而遭人詬病，其為氣態和懸浮微粒所組成之混合物(mixture)，包含數百種不同的有機和非有機物，像是二氧化碳( $\text{CO}_2$ )、氧氣( $\text{O}_2$ )、氮氣( $\text{N}_2$ )、水蒸氣、一氧化碳( $\text{CO}$ )、碳氧化物( $\text{NO}_x$ )、硫氧化物( $\text{SO}_x$ )以及多種低分子碳氫化合物(HC)，其中不乏有許多被認定為毒性空氣污染物之化學成分，像是：甲醛、乙醛、苯、多環芳香烴化合物(PAHs)和戴奧辛(dioxin)等。

柴油引擎尾氣中微粒主要由核心碳粒(center core)與吸附之有機物質並且包含少量  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、金屬與微量元素組成，主要粒徑大小 < 100 nm，提供大量可吸附有機物質之表面積，電子顯微鏡下顯示其周圍吸附高達 1800 種高分子有機物質(張瑋玲, 2005)；且懸浮微粒依其粒徑大小，有不同體內沉積效應，如圖 2-1(Witschger and Fabriès, 2005)。粒徑大於 10000

nm 之微粒，大部份可於鼻腔與上呼吸道即被移除；粒徑 2500~10000 nm 則主要沉積在氣管與上呼吸道黏膜纖毛；粒徑小於 2000 nm 可到達肺部深處並沉積於肺泡；且粒徑 10~20 nm 更有超過 50% 之微粒沉積於肺泡，只有少數 20% 微粒會被移除。因此，柴油引擎尾氣中微粒因其粒徑與表面吸附之有機物質因而包含大量潛在毒性。有機物質中像是 PAHs，其多吸附於微粒上進入人體肺部，研究顯示其具有致突變與致癌性。

### 暴露於柴油引擎尾氣

程如 2.2.1 所言，柴油引擎尾氣中微粒占大氣環境移動式污染源中 PM<sub>2.5</sub> 排放 50% 以上，且在氣態污染物上也具有大量的貢獻，台灣兩千三百萬人口每天暴露於一般大氣環境，尤其五都人口更占總人口 60%，人數高達一千四百萬人(行政院主計處, 2011)，都會區交通污染之排放更加劇大氣環境污染。因此，一般民眾對於柴油引擎尾氣之暴露只局限於特定地點或時間接觸柴油車輛，殊不知尾氣中污染物隨著大氣使得民眾暴露於無形中。而對於勞工之暴露更不在話下，不論農業、工業、交通運輸業或營造業等，使用柴油機具更是近距離暴露於引擎尾氣中，若在室內通風不良之工作場所，像是在公車或鐵路機房工作者，其污染物累積濃度值更為驚人；且由於柴油引擎尾氣除了對於嗅覺有直接影響外，其於潛在風險並無立即危害生命之虞，因而未有規定顯示勞工依配戴呼吸



防護具。由此可知，勞工長時間高濃度暴露於引擎尾氣中，對其產生之不良健康效應更值得關注。

### 柴油引擎尾氣健康效應

許多證據指出柴油引擎尾氣會造成負面健康影響，小至噁心、呼吸困難和皮膚過敏，大至癌症等。大量氣態污染物吸附於微粒表面，其化學成份對健康影響占相當之影響(Brunekreef and Holgate, 2002; Kampa and Castanas, 2008)。尾氣中之 $\text{NO}_x$ ，除了會導致 $\text{O}_3$ 生成，吸收光能產生光化學反應，導致能見度降低，更是溫室氣體(green house)與酸雨中主要成份，對人體造成呼吸方面的問題，造成哮喘、乾咳、頭痛和過敏等疾病。Balmes et al. (1987) 和 Kagawa (1985) 等人研究顯示，長時間暴露於低劑量的 $\text{NO}_x$ 會造成鼻、咽喉發炎、支氣管收縮、呼吸困難，特別在患有氣喘者更為嚴重；Wegmann et al. (2005) 針對小鼠進行 $\text{NO}_2$ 暴露，研究結果顯示小鼠暴露於 $\text{NO}_2$ 會導致其肺氣腫與肺癌(Balmes et al., 1987; Kagawa, 2001; Wegmann et al., 2005)。

Tager et al. (2005)研究顯示，長期暴露於 $\text{O}_3$ 導致年輕的成人肺功能降低(Tager et al., 2005)； $\text{O}_3$ 與穿透肺部上皮細胞之微粒產生反應引發肺部發炎(Uysal and Schapira, 2003)，造成患有肺部疾病之患者症狀加重或炎症。



CO 主要為交通運輸不完全燃燒所產生，暴露後會降低血液中含氧量，其影響人體各器官之功能(特別像在大腦與心臟高需氧器官)，除了導致精神不濟、注意力不集中與反應遲緩外，更影響血液凝結形成血栓，導致心絞痛與心肌梗塞(Vermlyen et al., 2005)。

流行病學研究顯示，暴露於戴奧辛會造成缺血性心臟病患者死亡率增加(Dalton et al., 2001)，且對造成肝細胞傷害及造成腸胃和肝臟癌症(Mandal, 2005)。毒性物質 PAHs，在動物實驗發現，食入會造成生殖系統、白血病、胃與肺部腫瘤等危害；吸入則會導致呼吸道癌症外，更引發免疫系統危害(US EPA, 2002)，且其毒性還會造成皮膚病、膀胱癌及神經受損等(Boffetta et al., 1997)。

引擎尾氣中之固態污染物，許多研究指出，吸入懸浮微粒與心肺有關之疾病發病率與死亡率有關，吸入之懸浮微粒會使原本患有心肺疾病之病人更加惡化，且肺部相關疾病住院率增加(Peters et al., 1997; Schwartz, 1994; Seaton et al., 1995)。相對於大粒徑的微粒，粒徑愈小的微粒除了會造成肺部傷害外，還可通過身體不同保護屏障，到達血液系統進而送至身體每一個部分，而造成身體各部位不同類型之傷害(Nel et al., 2006; Oberdorster et al., 2005)，像是心律失調、動脈與心肌梗塞，像是血栓和增加凝血(Dockery et al., 2005; Elder et al., 2004; Nemmar et al., 2002; Zhou et al., 2003)。

California EPA 報告指出，暴露於柴油引擎尾氣所造成之短期健康效應包括：巴士車庫工人職業暴露於柴油引擎尾氣會造成，肺功能減少、咳嗽、呼吸緩慢、胸悶與氣喘增加；且針對自願者暴露一小時柴油引擎尾氣後，明顯增加呼吸阻力和眼、鼻刺激。

暴露於引擎尾氣之長期健康效應包括：相對於未暴露者，明顯增加咳嗽、痰、慢性支氣管炎與肺功能降低。且會產生致癌效應，動物實驗中，暴露於柴油引擎尾氣導致肺部組織改變，包括肺泡上皮組織、巨噬細胞、血漿細胞增生、肺泡隔膜纖維化、肺泡壁增生和肺纖維化。長期暴露後，會誘發人體免疫反應和局部過敏反應，並導致哺乳動物細胞和染色體突變；在超過 30 人流行病學研究中，調查長期職業暴露於柴油引擎尾氣潛在致癌性，結果顯示長期暴露會增加肺癌相對風險(California EPA, 1998; Sydbom et al., 2001; Gustavsson et al., 2000)。

因此，1988 年美國國家職業安全衛生研究所(National Institute of Occupational Safety and Health, NIOSH)依據動物與人體證據，首先發表柴油引擎尾氣為潛在職業致癌物質；國際癌症研究署(International Agency for Research on Cancer, IARC)也匯集眾多毒理與流行病學研究結果，認定柴油引擎尾氣對人類極有可能致癌物質(Class 2A)，可看出柴油引擎尾氣對公共衛生及大眾健康的衝擊(IARC, 1986)。綜合上述，柴油引擎尾氣被認定為毒性空氣污染物，對公共環境與人類所產生的不良健

康效應，迫使我們需要對此做更深入的瞭解，以利未來可以進一步的改善。



## 2.3 柴油引擎微粒之特性

懸浮微粒為懸浮於空氣中之固態與液態微粒，粒徑介於 1~10000 nm 間，根據本研究量測粒徑範圍，將 < 1000 nm 粒徑之微粒定義為次微米懸浮微粒(submicrometer particle)；再依引擎尾器中微粒粒徑分布與生成機制，進行細部劃分。典型柴油引擎尾氣微粒數量、質量與表面積粒徑分布如圖 2-2(Whitby and Cantrell, 1976)所示，呈現雙峰分布情形，依其波峰粒徑位置將其劃分為(Kittelson et al., 2004)：

- 凝核峰(nucleation mode)微粒：

主要由 3-30 nm 粒徑微粒所組成，主要為大量微粒數量來源。通常為高溫燃燒過程中，氣態物質冷凝與核化，使得氣相物質轉化為固相微粒所產生之原生性微粒。

- 累積峰(accumulation mode)微粒：

主要由 30-500 nm 粒徑微粒所組成，主要為質量與表面積來源。通常為不完全燃燒產生之碳黑物質膠結或凝核峰微粒膠結成長所產生。

### 2.3.1 柴油引擎微粒生成機制與化學組成

柴油引擎尾氣中之粒狀污染物，主要生成機制如圖 2-3，分為兩種：

(1) 粒徑為 15-30 nm 之不規則形狀固態碳黑物質膠結、灰、有機揮發物和硫組成。(2) 尾氣中氣態污染物(包括  $\text{SO}_2$ 、 $\text{SO}_3$ 、 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 、低揮發性

物質和半揮發有機物)。當引擎高溫廢氣進入較低溫度的大氣環境，低揮發性物質( $H_2SO_4$ 和有機物質)經由稀釋與冷卻，使得氣相物質轉化為固相微粒，產生核化現象與凝結作用，導致粒徑 10-50 nm 微粒的生成 (Schneider et al., 2005)。

累積峰微粒主要為尾氣中碳黑微粒(carbonaceous soot particle)，在引擎燃燒初期高溫氧化狀態下即形成，經過膠結產生 30-500 nm 粒徑之微粒，且潤滑油中金屬添加物(Ca 和 Zn)也在燃燒過程中轉化為氣態物質，在尾氣稀釋與冷卻時轉變為固態微粒灰(ash)膠結形成累積峰微粒，且少部分核化。

凝核峰微粒主要藉由核化物質(硫酸和碳氫化合物)與飽和度所形成，在引擎尾氣排出排氣管至一般大氣環境，藉由大氣稀釋與冷卻後，揮發性前驅物質濃度達過飽和促使其核化與成長，因而產生凝核峰之微粒。但此前驅物也可能由於累積峰微粒吸附導致氣態轉化為固態，因此減少累積峰微粒才能迫使物質核化與成長成凝核峰微粒；由此，累積峰微粒對於凝核峰微粒有抑制效果。而相對來說，稀釋時間越短，其移除揮發性物質時間越少，故越容易發生核化；因此，揮發性物質與累積峰微粒濃度都為核化主要條件。對此，稀釋之溫度、時間和稀釋比都會對核化產生影響，進而影響微粒生成(Kittelson et al., 2006)。



### 2.3.2 揮發性物質之影響

由上述揮發性物質對於引擎尾氣微粒形成機制扮演著相當重要的角色，累積峰之微粒主要於引擎燃燒時形成，因此對於稀釋不敏感；但凝核峰之微粒，一般認為大多由低揮發性或半揮發性物質(semi-volatile)在稀釋時生成，且受到油品中含硫量多寡影響，若將其加熱，理應揮發而導致凝核峰微粒之消失。然而，近年研究中發現，將引擎尾氣樣本加熱後，卻還有凝核峰微粒存在，對此則推翻過去認為凝核峰微粒都為半揮發性物質所生成，故對此進行深入探討。

Rönkkö et al (2007)針對凝核峰微粒進行(非)揮發性探討，使用歐盟四期重型柴油引擎乙部，分別將廢氣樣本加熱與否進行比較。研究結果顯示在未加熱樣本時，所有操作條件，尾氣中微粒粒徑由大量粒徑 30 nm 左右之凝核峰微粒組成之單峰分布；直到將樣本加熱(270 °C)後，才可看到累積峰微粒與非揮發性物質(non-volatile)組成之凝核峰，如圖 2-4 所示。作者指出，操作條件、尾氣滯留時間、稀釋溫度和相對濕度，在此對微粒膠結或揮發都未造成重大影響；且油品含硫量多寡對於引擎尾氣數量濃度沒有影響，表示油品中硫不是造成凝核峰微粒之原因。因此在圖 2-4 中，即使樣本經過 270 °C 加熱後，在引擎最低負載條件下(圖 b)，尾氣中微粒還是呈現單峰分布且粒徑在最小量測範圍 3 nm；而在中負載操作條件下(圖 a)，則在呈現雙峰分布分別位於 9 nm 和 37-47 nm，不論在累

積峰或在凝核峰都具有非揮發性微粒。研究結果顯示，凝核峰中確實存在非揮發性固態微粒；且微粒在室溫範圍，隨著溫度上升幾何平均粒徑(GMD)逐漸減小，但在 130 °C 微粒達 6 nm 則達到定值，其表示吸附在固態微粒上之揮發性物質經由加熱後揮發，而量測到微粒核心(core)粒徑大小(Ronkko et al., 2007)。

Kittelsohn et al. (2006)也使用重型柴油引擎搭配不同含硫量柴油於實驗室進行尾氣中微粒數量濃度量測，四種不同引擎操作條件結果如圖 2-5 所示，圖中 TD 為將樣本加熱至 300 °C 去除揮發性微粒。主要粒徑分布呈雙峰分布，未加熱前，凝核峰微粒主要受油品中含硫量影響，累積峰微粒則無影響。在圖(d)引擎在重負載時，除了使用含硫量 325 ppm 油品有凝核峰微粒產生外，其餘都為大量累積性微粒，且經過加熱後，粒徑分布沒有太大之差異，顯示在引擎高負載情況下所排放之微粒主要都為固態碳粒。(b)和(c)圖樣本經過加熱後，在凝核峰微粒消失，粒徑分布產生相當大差異，顯示未加熱時所量測到之微粒都為低揮發性物質。而在(a)圖引擎惰轉時，尾氣樣本在加熱後，仍然在凝核峰範圍有相當高之非揮發性微粒數量；造成此主要因素為對凝核峰微粒有抑制效果之累積性微粒數量濃度太低，凝核峰微粒未被吸附因此存在尾氣中被測得；或是潤滑油中金屬灰、元素碳和一些高分子有機物，其沸點高於所加熱之溫度，故存在於引擎尾氣中(Kittelsohn et al., 2006)。

由以上研究結果，推翻引擎尾氣中凝核峰微粒大多由氣態低揮發性與半揮發性物質所組成，而是燃燒過程中，本身即可能產生在凝核峰粒徑大小之固態微粒，也顯示碳粒其實比過去所認為之粒徑還小。

### 2.3.3 引擎負載與轉速之影響：動力計試驗

引擎依其運轉型態，所排放之尾氣微粒數量也具有差異，本研究將其分為負載、轉速與暫態運轉進行探討。

#### 負載之影響

Wong et al. (2003)使用輕型柴油引擎，直接稀釋採樣將稀釋氣體加熱至引擎廢氣溫度避免冷凝，在引擎轉速 2200 rpm 下進行 10、50 和 100% 負載之比較，結果顯示 10、50 和 100% 負載之數量濃度排放分別為  $4.73 \times 10^6$ 、 $5.58 \times 10^6$  和  $7.37 \times 10^6$  #/cm<sup>3</sup>，中位數粒徑分別為 67.3、75.7 和 90.7 nm，由此顯示，引擎尾氣中微粒數量隨著負載增加其排放量也跟著增加，且粒徑隨負載而增大；粒徑分布之結果如圖 2-6 所示，Engine mode 1~3 分別為 10、50 和 100% 負載，圖中顯示各負載都呈現單峰分布，且不同負載在 40 nm 以下之微粒差異不大，主要粒徑差異位於累積峰之微粒，由圖可看出引擎在 10% 負載時，波峰位置約位於 48 nm，50% 負載時約位於 55 nm，100% 負載則位於 60 nm；顯示在引擎高負載操作下累積峰微粒排放也較多，主要歸因於高負載下油耗也增加導致燃燒排放也跟著增

加(Wong et al., 2003; Morawska et al., 1998)。

Jung and Kittelson (2005)用中型柴油引擎搭配一般市售柴油，在 1400 rpm 10、25 和 75% 負載下進行微粒數量粒徑分布量測，結果如圖 2-7 所示，由圖中可看出在引擎 75% 負載時，在所有粒徑範圍都為膠結所形成之累積峰微粒；相反的，引擎 10% 負載操作下，微粒主要由凝核峰與累積峰所組成之雙峰分布。累積峰主要為燃燒過程中碳黑微粒形成；而凝核峰則由於稀釋過程中，氣態物質凝結核化所形成(Jung and Kittelson, 2005; Shi and Harrison, 1999)。

Abu-Qudais et al. (2001)分別針對不同引擎負載進行了測試，發現在引擎 100% 負載時，主要粒徑出現於 90 nm 的單峰分布，如圖 2-8；反觀在引擎 50% 負載時，微粒粒徑分布呈雙峰分布，除了在 65 nm 有波峰外，在 9 nm 部分也有一個波峰，可看出引擎操作對尾氣中微粒之影響 (Abu-Qudais et al., 2001)。

Lehmann et al. (2003)也針對 25 和 100% 負載進行微粒數量之比較，數量濃度粒徑分布結果如圖 2-9 所示，由圖中可看出在所有測試條件下波峰均位於 58~75 nm，且 100% 負載之波峰位置有變小的趨勢，總數量濃度範圍  $5 \times 10^6 \sim 2.5 \times 10^7 \text{ \#/cm}^3$ ；換算其每秒數量濃度排放量如圖 2-10 所示，約為  $10^{11} \sim 10^{12} \text{ \#/s}$ ，100% 負載操作所排放之數量濃度均高於 25% 負載；由此可看出，引擎負載越高，其數量濃度排放越多，而在粒徑分布



上，都位於艾特坎峰，但 100% 負載之波峰有較小的趨勢，但主要差異不大(Lehmann et al., 2003)。

Park et al.(2003)也針對了引擎負載 10%和 75%進行測試，發現在引擎負載 10%時，其粒徑分布主要位置位於 32 nm 和 142 nm 之雙峰分布；而在 75%操作下，則呈現位於 209 nm 之單峰分布(Park et al., 2003)。

綜合以上結果顯示，引擎隨著負載增加，所排放之微粒數量濃度也跟著增加；主要由於高負載下，使用之燃料較多，且排氣量也較大，因而產生較多數量濃度排放(Morawska et al., 1998)。粒徑分布方面，惰轉或低負載時引擎排放大量凝核峰微粒，較少的累積峰微粒，呈雙峰分布(Tobias et al., 2001; Abdul-Khalek et al., 2000)；高負載則排放較多累積波微粒。主要原因為低引擎負載所排放之廢氣溫度較低，因而產生較多揮發性碳氫化合物，此揮發性物質凝結後核化，因而產生較多小粒徑之微粒；而高負載時，由於引擎燃燒溫度較高，故排放之微粒主要為燃燒時所形成之碳黑(soot)微粒(Moh'd Abu-Qudais et al., 2001; Park et al., 2003; Abdul-Khalek et al., 2000)。

### 轉速之影響

Morawska et al. (1998)針對柴油車進行不同速度之測試，結果顯示在引擎惰轉時，約排放數量濃度  $7.2 \times 10^6 \text{ \#/cm}^3$ ; 中速度排放  $2.8 \times 10^7 \text{ \#/cm}^3$  ;



高速度則為  $3.9 \times 10^7 \text{ \#/cm}^3$ 。結果顯示，相較於惰轉，中和高速度之微粒數量排放與惰轉之比值平均為 13 和 15，由此可知速度增加引擎尾氣微粒數量濃度也增加(Morawska et al., 1998)。

Wang et al. (2006) 依據 FTP 操作條件將行車型態分為加速、減速、定速與惰轉，在引擎加速時，超細微粒與艾特坎微粒數量濃度分別為  $4.4 \times 10^7$  和  $2.9 \times 10^8 \text{ \#/cm}^3$ ；引擎減速時，超細微粒與艾特坎微粒排放分別為  $1.5 \times 10^7$  和  $5.2 \times 10^7 \text{ \#/cm}^3$ ；定速時，超細微粒與艾特坎微粒排放分別為  $2.5 \times 10^7$  和  $1.5 \times 10^8 \text{ \#/cm}^3$ ；而在惰轉之排放分別為  $6.9 \times 10^7$  和  $2.5 \times 10^6 \text{ \#/cm}^3$ 。粒徑分布如圖 2-11 所示，由圖中可看出，引擎加速時，在超細微粒與艾特坎峰都有明顯之波峰，且相較於其他操作條件，加速時所排放之艾特坎峰明顯高於其他操作條件；而引擎惰轉時，不論數量濃度與粒徑分布結果都顯示，惰轉之超細微粒排放高於艾特坎微粒之排放，且所排放之超細微粒數量高於其他操作條件。由此可看出引擎在惰轉時，會排放大量小粒徑之微粒；而其他操作條件之微粒粒徑則位於艾特坎峰(Wang et al., 2006)。

Kittelson et al. (2004)於美國 Minnesota 高速公路使用移動式測量實驗儀器進行微粒數量之量測，數量濃度約為  $10^4 \sim 10^6 \text{ \#/cm}^3$ ，作者針對不同行車速度與粒徑分布進行量測，結果如圖 2-12，由圖中可看出行車速度增加凝核峰微粒數量隨之增加，而微粒粒徑則變小。

綜合以上，行駛速度越快，其排放微粒數量濃度越多；而引擎惰轉時，也具相當的排放量。在高速行駛時，微粒排放增加主要因素為高速行駛其引擎負載、廢氣溫度及排氣流量也會增加，且高速行駛瞬間可能會釋放低負載儲存於系統中之微粒，因而導致微粒排放增加(Kittelsohn et al., 2004; Zhu et al., 2002a; Zhu et al., 2002b)。

### 暫態之排放

Wang et al. (2006)使用 1999 年出廠中型柴油引擎，美國一般市售超級柴油(NO.2 certification diesel)於動力計進行美國暫態循環測試(FTP)，使用 Engine Exhaust Particle Sizer(EEPS)量測引擎尾氣之數量濃度粒徑分布，綜合引擎尾氣所排放之數量濃度為  $8 \times 10^8 \text{ \#/cm}^3$ ，平均使用每克(g)燃料排放  $4.7 \times 10^{12}$  particles (Wang et al., 2006)。

Lehmann et al. (2003)針對了一系列重型柴油引擎於動力計下，分別進行了歐洲暫態循環(ETC)和美國暫態循環(FTP)測試。在歐洲測試循環下，引擎排放微粒數量濃度範圍為  $1 \times 10^{12} \sim 6 \times 10^{12} \text{ \#/s}$ ；在美國暫態循環操作下，冷啟動排放微粒數量濃度範圍  $1.9 \times 10^{12} \sim 7.8 \times 10^{12} \text{ \#/s}$ ，熱啟動排放則為  $1 \times 10^{12} \sim 3.5 \times 10^{12} \text{ \#/s}$ ，可看出不論在冷熱啟動，引擎尾氣每秒排放都達到  $10^{12}$  particles，且使用 CPC 進行量測時，冷啟動排放微粒數量濃度均高於熱啟動排放；而粒徑分布之結果如圖 2-13 所示，不同引擎在

歐洲暫態循環下均呈單峰分布，除了在Engine2波峰位置有些許差異外，主要微粒數量波峰位於 120 nm (Lehmann et al., 2003)。

使用暫態循環進行量測，可反應實際行車情況進而推估車輛行駛時排放之情形。因此，綜合以上推估，引擎於行駛時每秒排放高達  $10^{12}$  particles，依數量濃度則為  $10^8$  particles。

Beddows and Harrison (2008)與 Keogh et al. (2009)彙整許多動力計、隧道和路邊測試結果，進而發現與估算柴油引擎尾氣超細懸浮微粒之數量排放係數，結果顯示重型車之排放係數約為  $10^{14}$  -  $10^{15}$  #/km，且重型柴油引擎所排放之微粒數量約為輕型柴油引擎 10~20 倍(Beddows and Harrison, 2008; Jones and Harrison, 2006; Keogh et al., 2009)。

整體而言，我們可以發現排放的尾氣當中，不論在歐洲、美國暫態或穩態在不同負載操作中，微粒數量濃度都在  $10^{12}$  #/km 以上，且粒徑分布位於 200 nm 以下，可看出引擎尾氣所排放的微粒數量是非常驚人的。然而在國內截至目前為止卻沒有針對此方面的研究進行探討，故本研究將針對重型柴油引擎進行美國暫態與穩態進行數量濃度的了解，以及早進行管制與改善。

## 2.4 柴油引擎使用之油品

柴油的組成特性，與燃燒產生的物質有相當的關連，故其與引擎廢氣中懸浮微粒和 NO<sub>x</sub> 的排放，還有溫室氣體的產生有直接的影響，針對柴油的發展主要為降低柴油中含硫量和添加生質柴油。

### 2.4.1 柴油中含硫量之影響

硫成分與水為核化過程中主要前趨物質，柴油中含硫量過高時，會使得燃燒過後與燃燒所產生之水分結合，形成亞硫酸或硫酸，導致機械侵蝕，造成硫氧化物之排放；且 SO<sub>x</sub> 與水分所形成之揮發性物質，會促使尾氣中核化，產生大量凝核峰微粒。研究顯示使用低硫柴油會降低懸浮微粒的排放、避免硫產生的毒性與降低 SO<sub>3</sub> 的產生(TW EPA, 2010b; Bardasz, 2004)。

Wang et al.(2006)研究中顯示，使用超低硫柴油每立方公分所排放之數量微粒數為使用一般柴油減少 19%，如果以消耗每公克油來看則減少 33%(Wang et al., 2006)。

Grose et al.(2006)也針對含硫量 50(BP50)及 15 ppmv(BP15)之柴油進行研究，結果發現 BP15 與 BP50 之排放數量濃度分別為  $1.7 \times 10^8$  和  $8.8 \times 10^8$  #/cm<sup>3</sup>；且粒徑分布都呈雙峰分布，如圖 2-14，BP15 主要波峰位於 4.4 nm，而 BP50 主要波峰位於 6.6 nm。不同油品之粒徑分布主要差異



在於 3-30 nm 之凝核峰微粒，顯示使用含硫量較低之柴油，其不管在數量濃度或是主要粒徑上，都比含硫量較多的柴油來的小(Grose et al., 2006)。

Kittelson et al. (2006)也針對四種不同含硫量柴油進行測試，分別為含硫量 1、26、49 和 325 ppm，研究結果如圖 2-5 所示。在各種操作條件下，含硫量 325 ppm 柴油其數量排放都高於其他含硫量之柴油，其後隨著含硫量減少所排放之微粒數量也跟著遞減，由其在凝核峰微粒有明顯之趨勢，然而在某些操作條件下，含硫量 1 和 26 ppm 排放沒有明顯之差異，其主要為硫含量已很少到不致影響微粒之範圍(Kittelson et al., 2006)。

#### 2.4.2 生質柴油之影響

另一種改變油品的方法為生質柴油(biodiesel)之使用，主要為經濟之考量，由於人類大量使用石化燃料(fossil fuel)導致全球能源蘊藏愈來愈少，且大氣中溫室氣體濃度增加使得全球氣候異常，世界各國都推動使用具有再生性的生質燃料，以減少石化燃料的使用及二氧化碳排放。生質柴油又稱為生物柴油，主要是未加工或使用過之植物性或動物性脂肪做為原料，經由轉酯反應生成之燃料，主要原料有大豆、油菜花、向日葵和棕等植物油，或是回收食用油經純化後所產生之油品，其主要優點



為再生性能源，可被生物降解且被氧化性，無毒且燃燒後所產生氣體污染性低，減少引擎廢氣污染物排放，特別是溫室氣體二氧化碳及硫氧化物的減量，因此可直接代替石化柴油或混合石化柴油使用。

然而，生質柴油依其燃料特性，對引擎燃燒與尾氣排放污染物也會有所不同，Xue et al. (2011)回顧針對生質柴油所做之研究，歸納出生質柴油由於其熱值、黏度、油耗和耐久性與一般柴油有差異，因此使用生質柴油對引擎馬力(power)、燃燒效率有降低的趨勢，但添加低比例則沒有明顯之差異。但也有研究顯示使用生質柴油會提高燃燒效率、油耗與引擎零件磨損；但由於生質柴油本身固有之潤滑效果與低碳排放，因此對於引擎耐久性無明顯差異(吳澤松 et al., 2005)。對污染物而言，生質柴油含氧量高且芳香族化合物少，因此對於PM排放有降低的趨勢。然而在NO<sub>x</sub>排放上則有增加的趨勢，其主要由於含氧量高；且十六烷值和不同的注油特性也會對NO<sub>x</sub>產生影響。溫室氣體CO<sub>2</sub>因為生質柴油中含氧量高且低碳氫比，而具有減量的效果；但也有研究顯示使用生質柴油相較於一般柴油CO<sub>2</sub>排放增加或不變，其主要原因為生質柴油燃燒效率高。高含氧量也促進燃料噴射與燃燒，因而降低HC化合物和THC的排放，對於芳香族和多環芳香烴化合物也具有減量的效果。相關文獻也指出單就污染物而言，除了NO<sub>x</sub>生質柴油添加比例越高減量也越多(Lapuerta et al., 2008a; Xue et al., 2011)。

研究顯示，使用大豆所製成之生質柴油與石化柴油排放之空氣污物之差異，發現生質柴油可降低 PM、CO、HC 之排放，但會些微的增加 NOx 的排放(Canakci, 2007; Schumachera et al., 1996)。Lapuerta et al.(2005) 針對一般市售油柴油、100%生質柴油及添加 25%之向日葵(sunflower)和朝鮮薊(cynara cardunculus)和一般市售柴油組成，發現使用一般市售柴油其每平方公分所排放數量濃度為最高，而使用 100%向日葵及朝鮮薊所組成的生質柴油期排放濃度為最低，詳細如圖 2-15，由圖中可看出添加 25%之生質柴油比一般市售柴油數量濃度排放係數來的低(Lapuerta et al., 2005)。

Bagley et al.(1998)使用低硫柴油(D2)及生質柴油做不同扭力和負載之比較，發現使用 D2 油品在扭力/負載為 2200/100 及 1500/50 時，其數量濃度排放低於生質柴油；而在扭力/負載為 1500/100 時，D2 之數量排放則多於生質柴油。在主要波峰位置上，生質柴油之波峰位置都比使用低硫柴油 D2 來的小，如圖 2-16，其可見生質柴油在此研究中所產生的粒徑較小(Bagley et al., 1998)。

Di et al. (2009)使用以廢食用油為原料之生質柴油，針對添加 20、40、60 和 80%比例之混合生質柴油進行三種不同負載量測，以低負載為例如圖 2-17。結果顯示，在各種負載條件下，生質柴油排放微粒數量濃度都高於超低硫柴油，且隨著添加比例越高，尾氣微粒數量濃度也越多；而

在粒徑方面，隨著添加比例增加，粒徑也越來越小。作者表示，生質柴油為酯結構，因此降低碳黑(soot)排放之效果較差；且生質柴油黏度較高，因此在注射燃料時霧化效果較好，造成空氣燃料混合均勻而產生較多凝核峰微粒；與生質柴油高沸點低揮發，因此也造成較多微粒排放(Di et al., 2009)。



## 2.5 柴油引擎微粒之控制技術

現今有許多針對柴油引擎之控制技術可以改善引擎排放，包括從引擎本體源頭進行改善之曲軸箱、引擎設計像是將引擎注油從間接噴射改成直接噴射，利用多孔噴油嘴將燃油直接注入氣缸迅速點燃，減少熱損失與油耗，因而降低污染物排放，到末端控制於尾氣端加裝氧化觸媒器等。

本研究主要尾器控制技術即為裝設濾煙器(diesel particulate filters, DPF)及氧化觸媒器(diesel oxydation catalyst, DOC)。雖然從源頭改變引擎的設計可以減少微粒排放，然而，面對日趨嚴格的管制標準引擎設計改善已經到達技術所及，故於尾氣端加裝設後處理設備則為較有效益之方法。

柴油催化劑首次用於 1970 年地下挖掘工作，使用簡單氧化催化以達到 CO 與 HC 之轉化，逐漸演化為現代使用之 DOC(Majewski, 2010)。DOC 主要藉由 O<sub>2</sub> 促進化學氧化來消除尾氣中 HC、CO 與少量 SOF 污染物排放，其使用鉑(Pt)、鈀(Pd)或銠(Rh)等貴重金屬塗敷於蜂巢式的陶瓷結構上，將廢氣中的 HC 和 CO 氧化成 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 較無害之物質，如圖 2-18。當尾氣流經含氧轉化器時，CO 會吸附在鈀表面，阻礙氧氣吸附而降低 CO 氧化速率；而 HC 會吸附在鉑表面，與氧氣氧化形成 H<sub>2</sub>O。鉑具有抗高溫燒結的能力，但會受 Cl 和 Br 等物質發生化學反應，毒化觸媒而

失去活性，因此會將鉑和鈀混合做為混合物。

DPF 首次出現於 1985 年加州賓士汽車配備中(Abthoff, 1985)，期間雖然曾退出市場，但其為控制尾器中微粒排放最有效之方法，因此從 1990 年代後，則有大幅度的修正、改良使其應用於降低污染排放上。DPF 主要由極細小孔隙的緊密濾蕊材料組成，構造可分為兩種，如圖 2-19 所示。圖(a) 為壁流式構造(wall-flow)，其通道一端進氣一端封閉，迫使氣流穿過四周由濾材組成之屏障，藉此達到微粒過濾效果；圖(b) 為直流式構造(flow-through)，氣流可由進氣通道直接被排出，其主要藉由濾材表面擴散攔截柴油引擎尾氣中固態懸浮微粒，達到過濾的效果。濾材捕集原理為主要藉由碰撞、截流和擴散原理(Perry, 1984)，如圖 2-20 所示。針對 DPF，微粒過濾效率越高、排氣阻力越低、機械強度和抗震動性能高，還須具備耐熱衝擊性與耐腐蝕性為濾煙器所具有的特性。研究顯示濾煙器對引擎廢氣在質量上具有減量的效果，但在數量上卻呈保留的情況，因為經過濾煙器後累積峰微粒降低，可能會導致廢氣中核凝波峰微粒沒有可凝結之表面，因而使得尾氣中凝核峰微粒增加(Bagley et al., 1998; Zhu et al., 2010; Abdul-Khalek et al., 1998)。

相反的，也有研究顯示加裝濾煙器對排放微粒有減量的效果。Frank et al.(2007)針對三種後處理設備(氧化觸媒器 DOC、持續再生濾煙器 CRDPF、廢氣循環再生濾煙器 EGR-CRDPF)進行研究，結果如圖 2-21，



顯示當使用 DOC 時，排放之數量濃度稍低與未加裝時相近，且在粒徑分布上與未加裝後處理設備的引擎廢氣沒有什麼不同；但在加裝 CRDPF 與 EGR-CRDPF 時，其數量濃度排放比為加裝時降低 97%，且在使用 EGR-CRDPF 達到最低的排放；而在粒徑分布上，此四種操作參數都在 110 nm 的時候有最高的濃度範圍，而在使用 EGR-CRDPF 的時候 30 nm 的微粒有最低的濃度範圍(Frank et al., 2007)。

Shibata et al. (2010)使用重型柴油引擎在歐洲暫態與穩態循環下，搭載 DOC 與 DOC+DPF，使用 EEPS 進行尾氣微粒量測，結果如圖 2-22 所示。結果顯示，搭載 DOC 無明顯之減量效果；而 DOC+DPF 則由高達 99%的數量濃度減量。粒徑分布不論在 ETC 和 ESC 運轉下，微粒數量濃度粒徑分布都呈現雙峰分布，且搭載尾氣候處理設備後粒徑分布也無太大差異，主要波峰位於 50 nm，次要波峰位於 10 nm 左右，且結果顯示 DOC+DPC 在 5.6-200 nm 為微粒減量效率最好(Shibata et al., 2010)。

Kim and Choi (2010)使用柴油引擎在歐洲穩態循環下，進行不同油品搭配氧化觸媒與氧化觸媒濾煙器兩種後處理設備測試，結果如圖 2-23 所示。由圖中可看出主要探討粒徑範圍分為 < 50 nm、< 100 nm 和 < 385 nm 微粒，在不同粒徑與不同油品，尾氣加裝 DOC 或 CPF 對微粒都具有減量效果，加裝 DOC 數量濃度平均減量 8-12%，而裝設 CPF 減量效果

則高達 98%。其可看出，DOC 和 CPF 對引擎尾氣中微粒都具有減量之效果，對於粒徑<50 nm 之小微粒也沒有增量，且使用不同油品其減量效率還是相同(Kim and Choi, 2010)。

綜合上述研究，使用濾煙器對於引擎廢所排放的微粒數量上，有持正面也有反面的效果，故在引擎尾氣數量排放上，濾煙器之使用為值得深入探討的議題。



## 2.6 法規排放標準與國際趨勢

表 2-3 為我國與其他先進國家重型柴油引擎排放標準的比較，柴油引擎在粒狀污染物管制上，各國制定之排放標準逐年加嚴，比如歐洲在 2005 年 PM 排放標準已降至 0.01 g/bhp-hr，美國也在 2007 年跟進，我國也將於 2012 年柴油引擎第五期的排放標準，施行此標準；而在 HC、NO<sub>x</sub> 的排放標準則比其他國家標準較為寬鬆；而在 CO 的標準上，較美國嚴謹，但相對於歐洲與日本則較為寬鬆。然而，柴油引擎尾氣數百種污染物，只能以總質量(TSP)進行管制；但值得注意的是柴油引擎尾氣中，大部份質量都由碳膠結與吸附其他物質所形成之累積峰微粒所貢獻，而 90%之數量由凝核峰微粒所貢獻但對質量貢獻卻不到 10%，因此針對質量進行管制將會忽略引擎尾氣中高濃度之微粒數量，且質量管制標準也趨於目前六位數天秤偵測極限；而道路旁針對柴油引擎進行量測結果顯示，數量濃度範圍  $10^4$ - $10^6$  #/cm<sup>3</sup>，與一般大氣環境中微粒數量濃度  $10^4$  #/cm<sup>3</sup> 相比(王顛婷, 2009)，有 100 倍的增量。因此，從歐盟的五期開始，對輕型客、貨車新增訂微粒數量濃度的排放標準( $6 \times 10^{11}$  #/km)，我國在柴油引擎五期也跟進針對輕型柴油引擎訂定相同之數量濃度排放標準，預期未來將會擴大適用對象，包括重型柴油引擎。聯合國-歐盟有鑑於引擎尾氣數量濃度易受到採樣時控制條件影響，因此在微粒數量量測系統(UN-ECE PMP)，將稀釋後之樣本進行高溫加熱至 400 °C，此加熱程序

可去除揮發性物質確保採樣之樣本為非揮發性固態微粒。

表 2-4 為先進國家重型柴油引擎數量排放係數，可看出隨著歐盟期數的增加，排放係數呈現下降的趨勢，從  $10^{14}$  下降到  $10^{12}$  #/km；而在行車型態上，從市區到高速公路呈現上升趨勢，約高 2 倍。綜合不同研究來探討，微粒數量排放係數範圍介於  $1.8 \times 10^{12}$  到  $7.3 \times 10^{15}$  #/km 之間 (Beddows and Harrison, 2008; EEA, 2009; Jones and Harrison, 2006)。



表 2-1 固定與移動污染源對不同污染物貢獻百分比

污染源種類	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>6</sub>	PM <sub>2.5</sub>	SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	THC	NMHC	CO	Pb
	百分比%									
固定污染源	94.66	90.28	88.88	82.53	93.17	45.53	78.97	77.50	22.27	98.65
移動污染源	5.34	9.72	11.12	17.47	6.83	54.47	21.03	22.50	77.73	1.35

表 2-2 在移動污染源中柴油車對不同污染物貢獻百分比

污染源種類	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>6</sub>	PM <sub>2.5</sub>	SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	THC	NMHC	CO	Pb
	百分比%									
柴油車排放	43.62	51.97	53.40	56.07	3.15	64.21	8.66	9.39	9.26	0.00



表 2-3 我國與先進國家重型柴油引擎排放標準

排放係數(g/bhp-hr)					
Country	Year	CO	HC	NOx	PM
Taiwan	1993-1999(II)	10.00	1.30	6.00	0.70
	1999-2007(III)	10.00	1.30	5.00	0.10
	2007-2012(IV)	10.00	1.30	2.40	0.10
	2012+(VI)	10.00	0.14	0.20	0.01
US	1994-1997	15.50	1.30	5.00	0.10
	1998-2003	15.50	1.30	4.00	0.10
	2004-2006	15.50	0.50	2.00	0.10
	2007+	15.50	0.14	0.20	0.01
Europe	1996-2000(II)	2.98	0.82	5.22	0.19
	2000-2005(III)	1.57	0.49	3.73	0.07
	2005-2008(IV)	1.12	0.34	2.61	0.01
	2008-2013(V)	1.12	0.34	1.49	0.01
	2013(VI)*	1.12	0.10	0.37	0.01
Japan	1994-1997	5.52	2.16	4.47	0.52
	1997-2003	5.52	2.16	3.36	0.19
	2003-2005	1.66	0.65	2.52	0.13
	2005-2009	1.66	0.13	1.49	0.02
	2009+	1.66	0.13	0.52	0.01

\*將會增列微粒數量排放標準。

表 2-4 先進國家重型柴油引擎之微粒數量排放係數

	Emission standard	Speed range (km/h)	Emission factor (10 <sup>13</sup> #/km)		
			Urban	Rural	Highway
EEA (2009)	Euro II and III	10-110	31.9	27.2	69.9
	Euro II and III+CRDPF	10-110	12.6	2.85	5.48
	Euro II and III+SCR	10-110	35.5	24.0	80.1
	Euro IV+CRDPF	10-110	0.27	0.21	0.18
	Euro V+SCR	10-110	0.80	0.64	0.74
Jones and Harrison (2006)	-	-	Range: 0.34 - 18		
Beddows and Harrison (2008)	-	-	Range: 22 - 730		

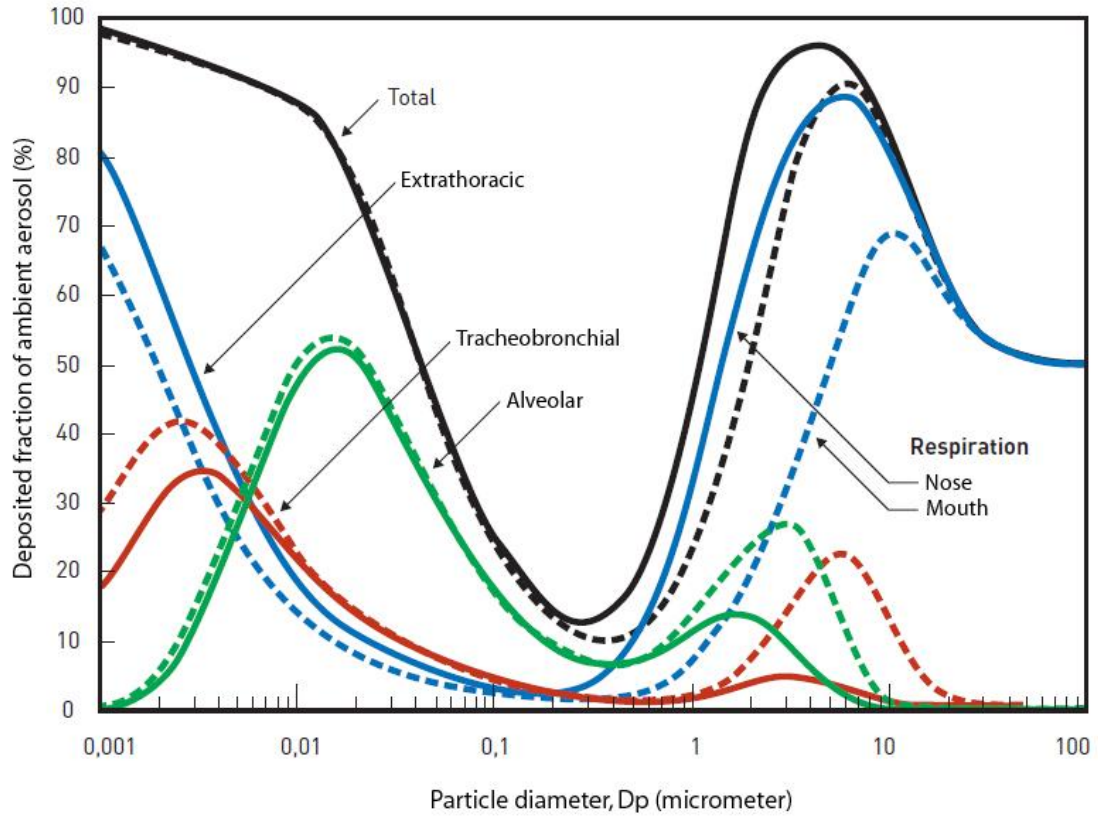


圖 2-1 不同粒徑微粒沉積於呼吸道百分比  
(Witschger and Fabrière, 2005)

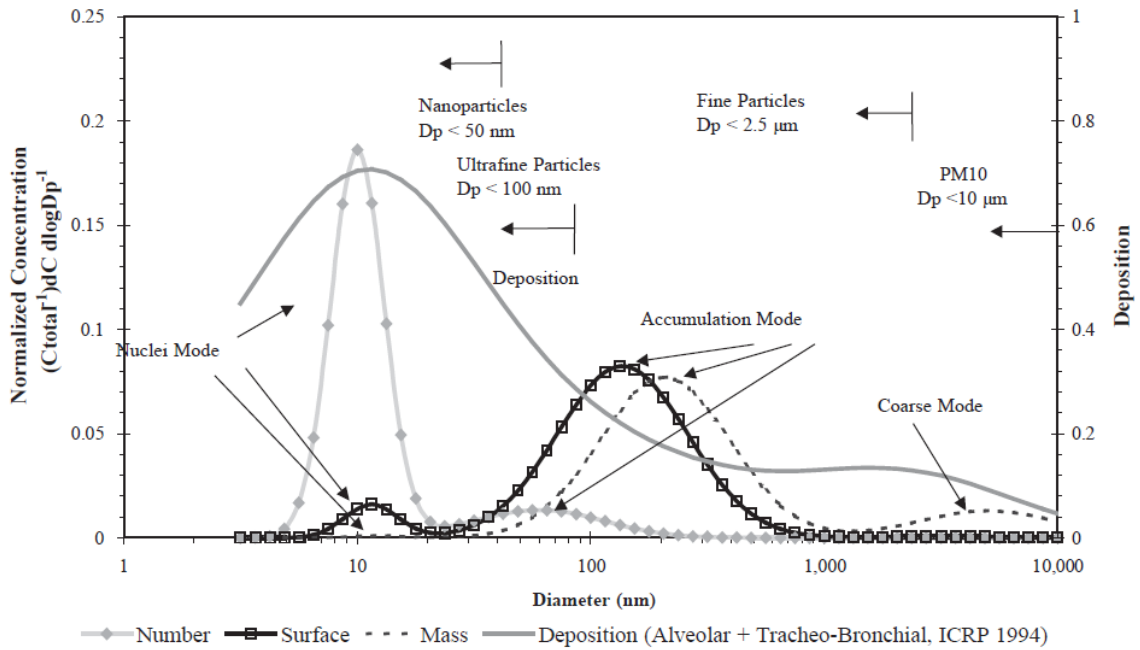


圖 2-2 柴油引擎尾氣中懸浮微粒粒徑分布圖  
(Whitby and Cantrell, 1976)

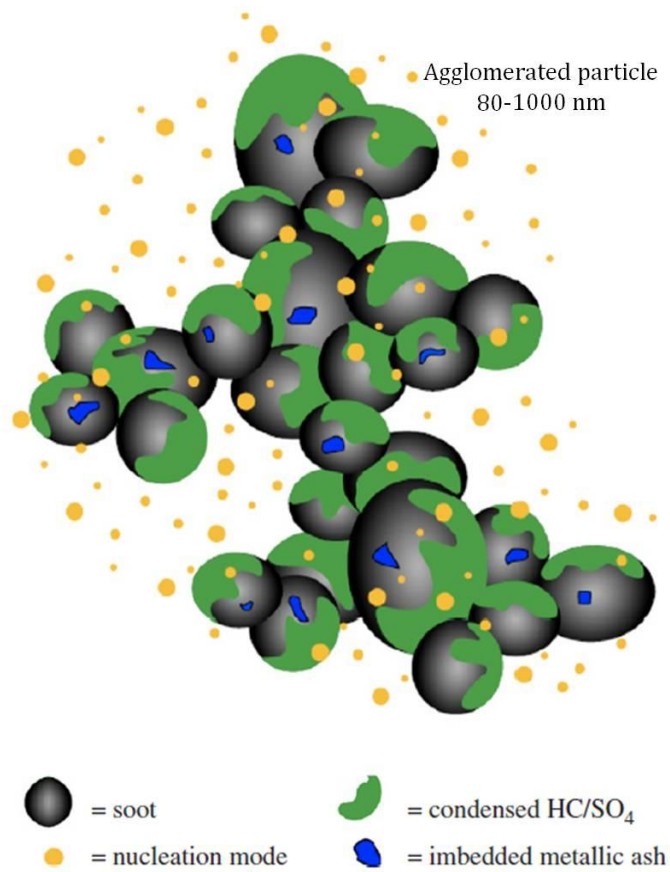


圖 2-3 柴油引擎尾氣粒狀污染物組成圖

(Maricq, 2007)

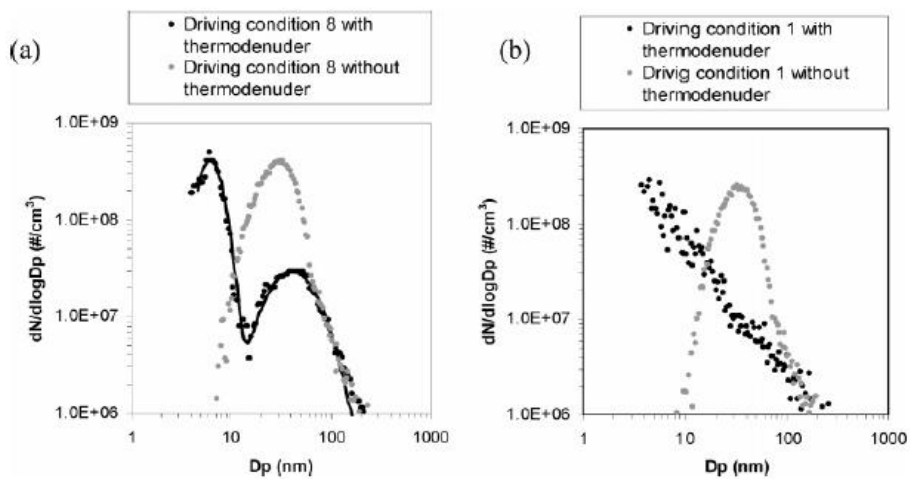


圖 2-4 不同操作條件下尾氣樣本加熱與否微粒數量濃度粒徑分布

(a)1590 rpm/949 Nm (b)1490 rpm/273 Nm (樣本加熱溫度 270°C)

(Rönkkö et al., 2007)

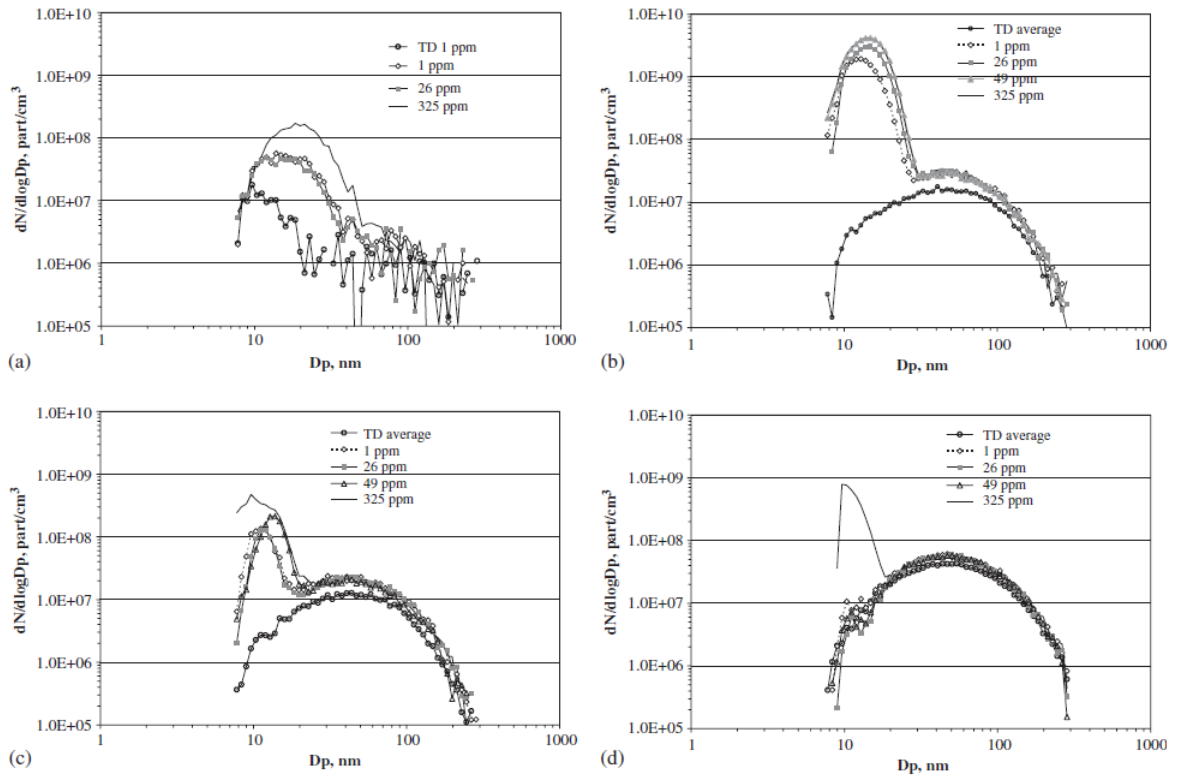


圖 2-5 使用不同含硫量(1 到 325 ppm)柴油在不同操作條件下為粒數量濃度粒徑分布 (a)惰轉 (b)輕中型負載 (c)輕負載 (d)重負載 (TD 為樣本加熱至 300 °C) (Kittelson et al., 2006)

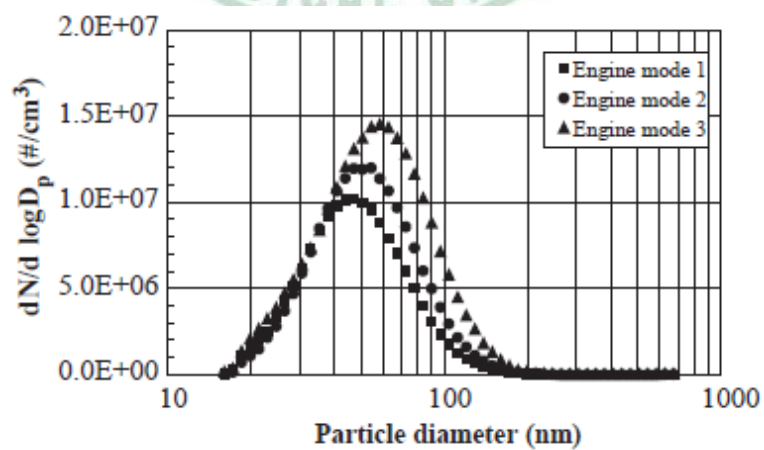


圖 2-6 不同負載之數量濃度粒徑分布

(Wong et al., 2003)



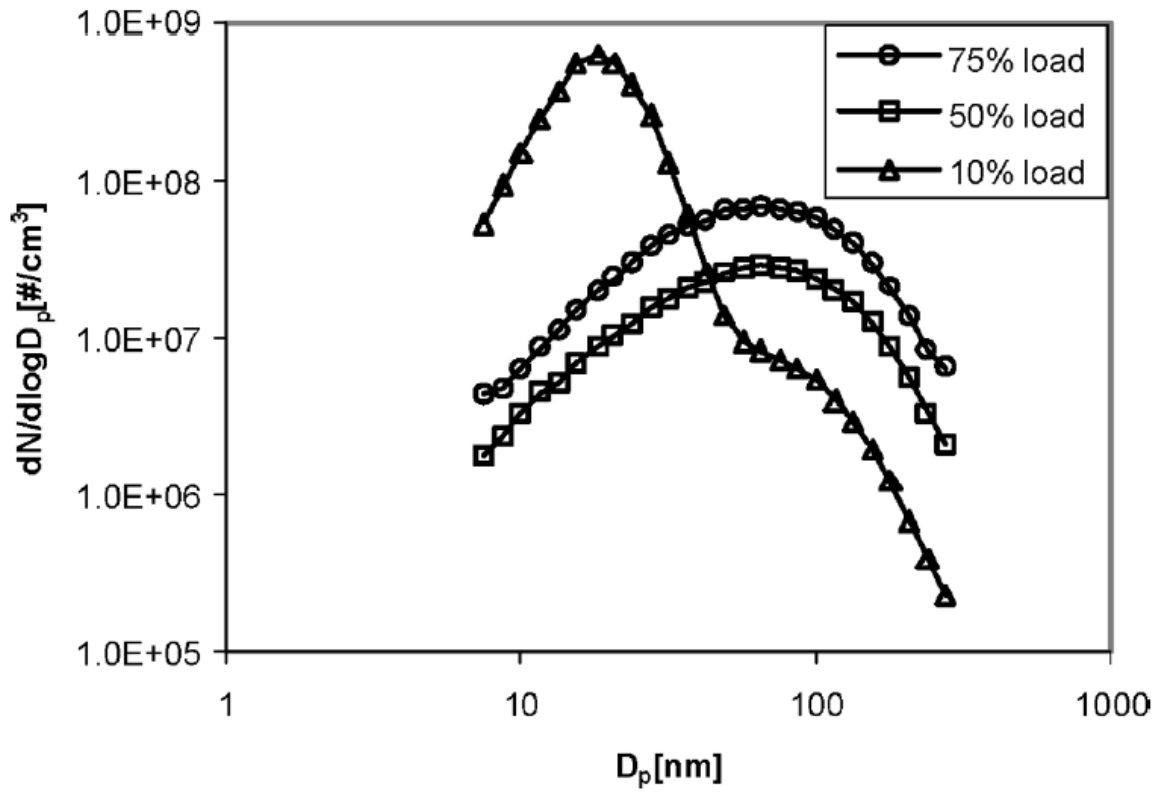


圖 2-7 引擎在固定 1400 rpm 下不同負載之微粒數量濃度粒徑分布

(Jung and Kittelson, 2005)

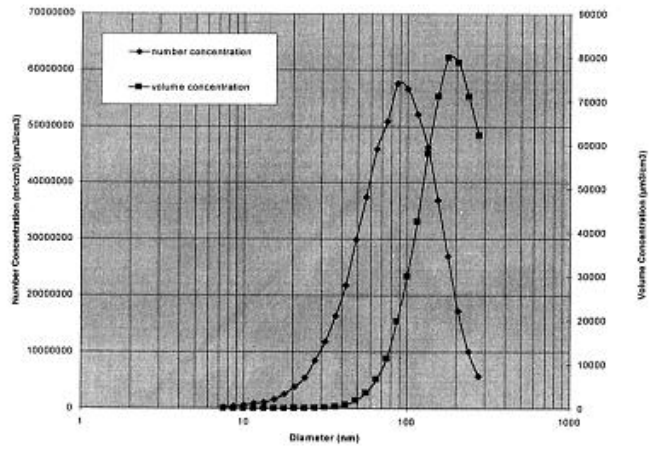


Fig. 2 SMPS particle number and volume concentrations for the 100% load case

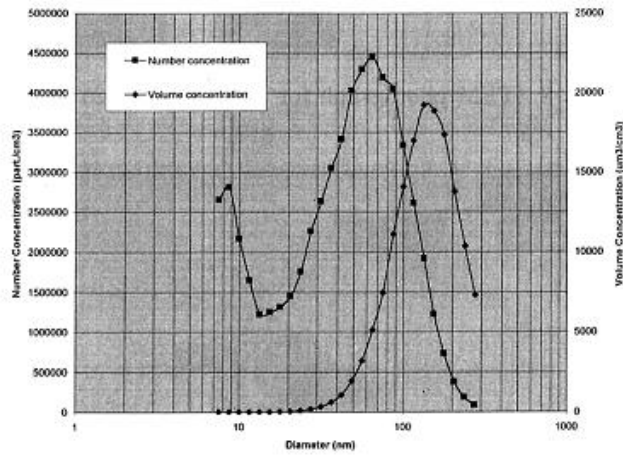


Fig. 3 SMPS particle number and volume concentrations for the 50% load case

圖 2-8 不同負載引擎尾氣中微粒數量粒徑分布 (上圖)100%負載 (下圖)50%負載

(Abu-Qudais et al., 2001)

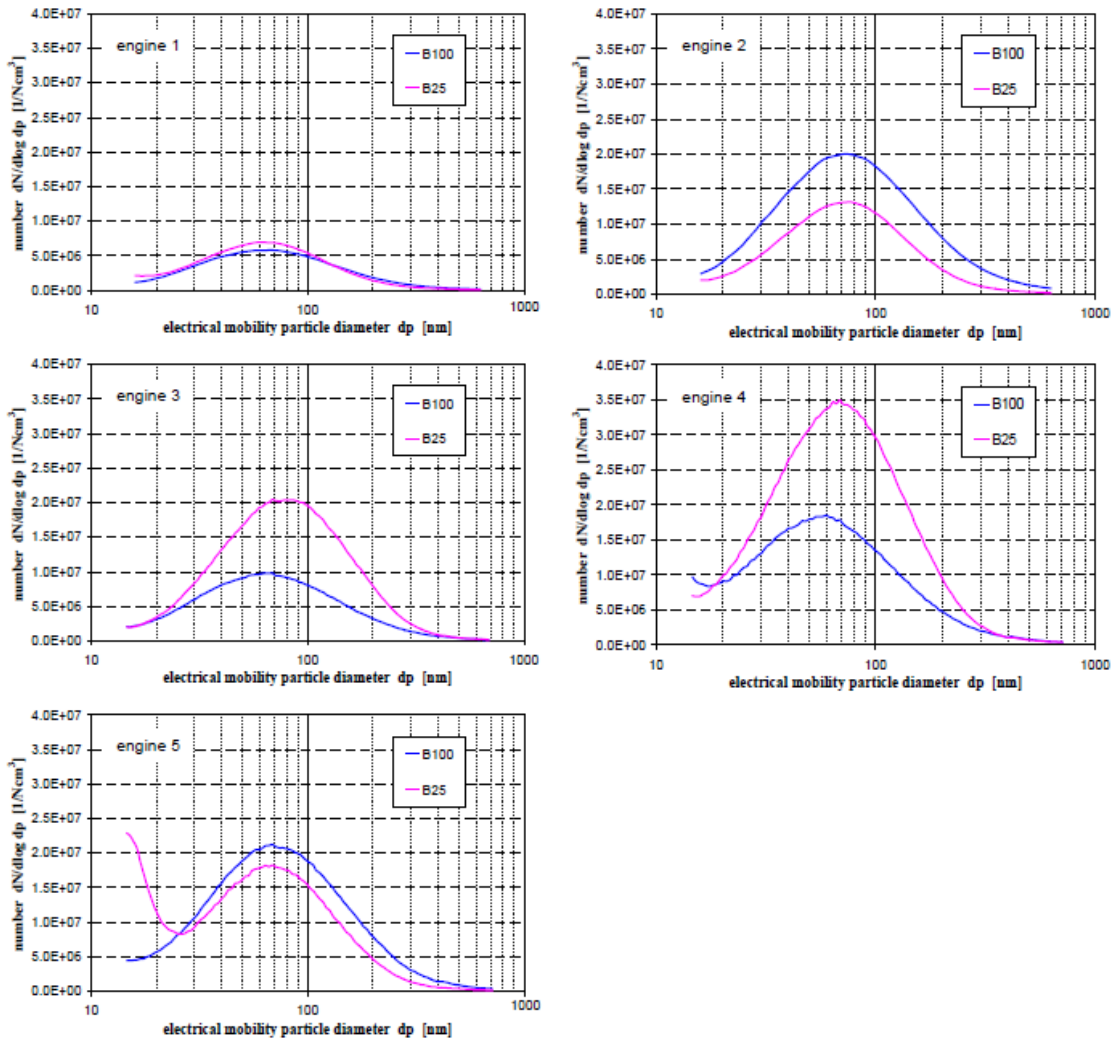


圖 2-9 使用不同引擎在 100 與 25% 負載下微粒數量濃度粒徑分布  
(Lehmann et al., 2003)

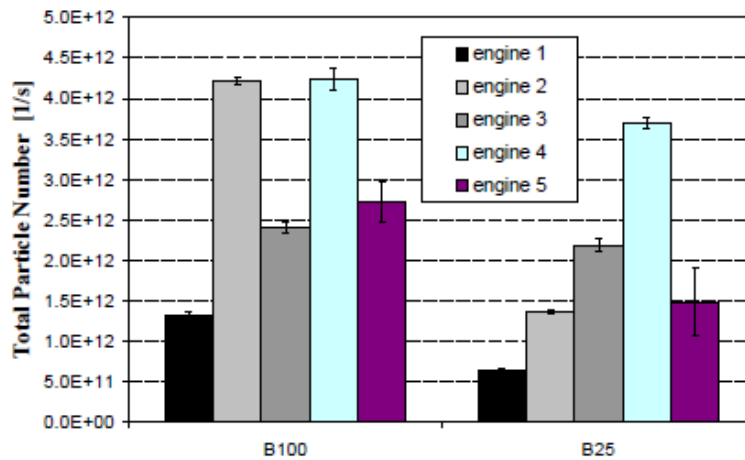


圖 2-10 使用不同引擎在 100 與 25% 負載下微粒數量濃度  
(Lehmann et al., 2003)

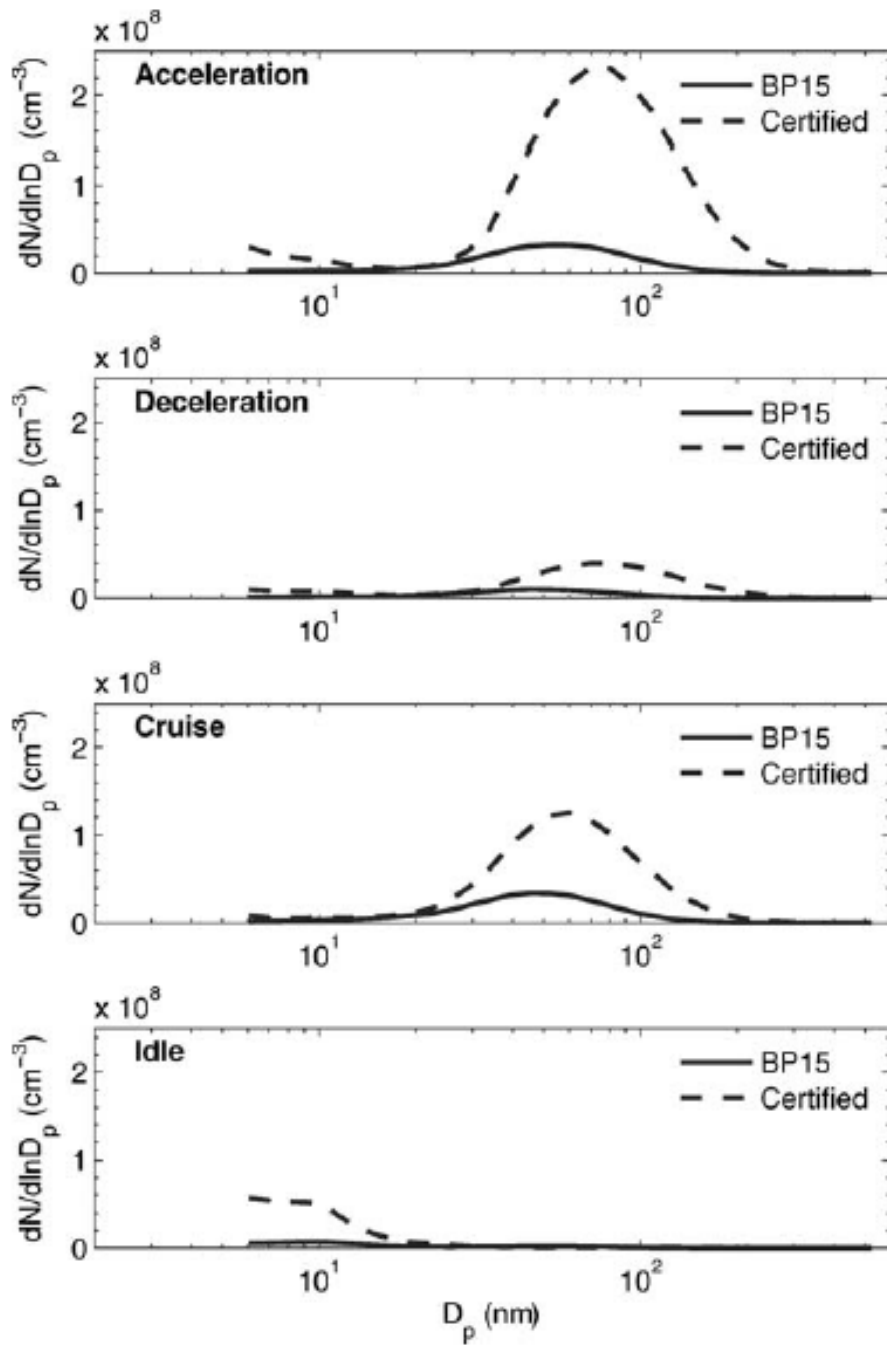


圖 2-11 使用一般市售超級柴油(certified)與低硫柴油(BP15)在各操作條件下數量濃度粒徑分布 (a)加速 (b)減速 (c)定速 (d)惰轉  
(Wang et al., 2006)

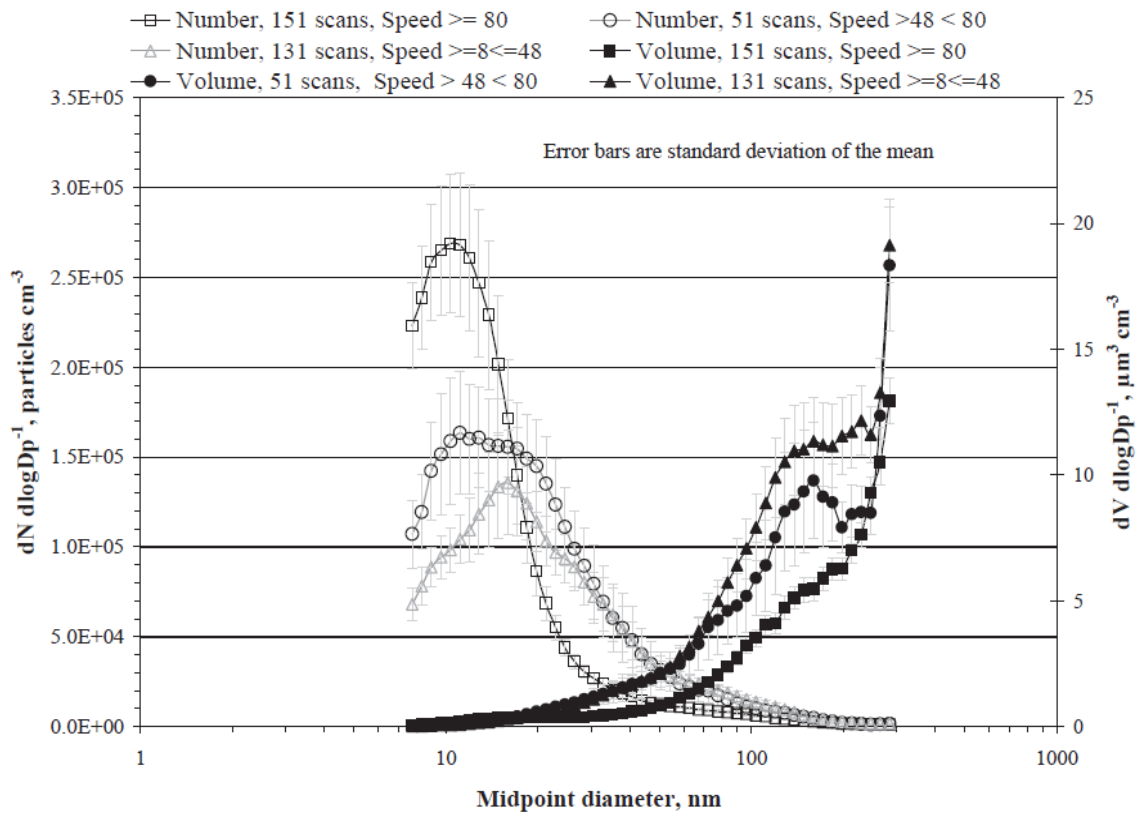


圖 2-12 Minnesota 高速公路上不同車速之數量濃度與體積粒徑分布

(Kittelson et al., 2004)





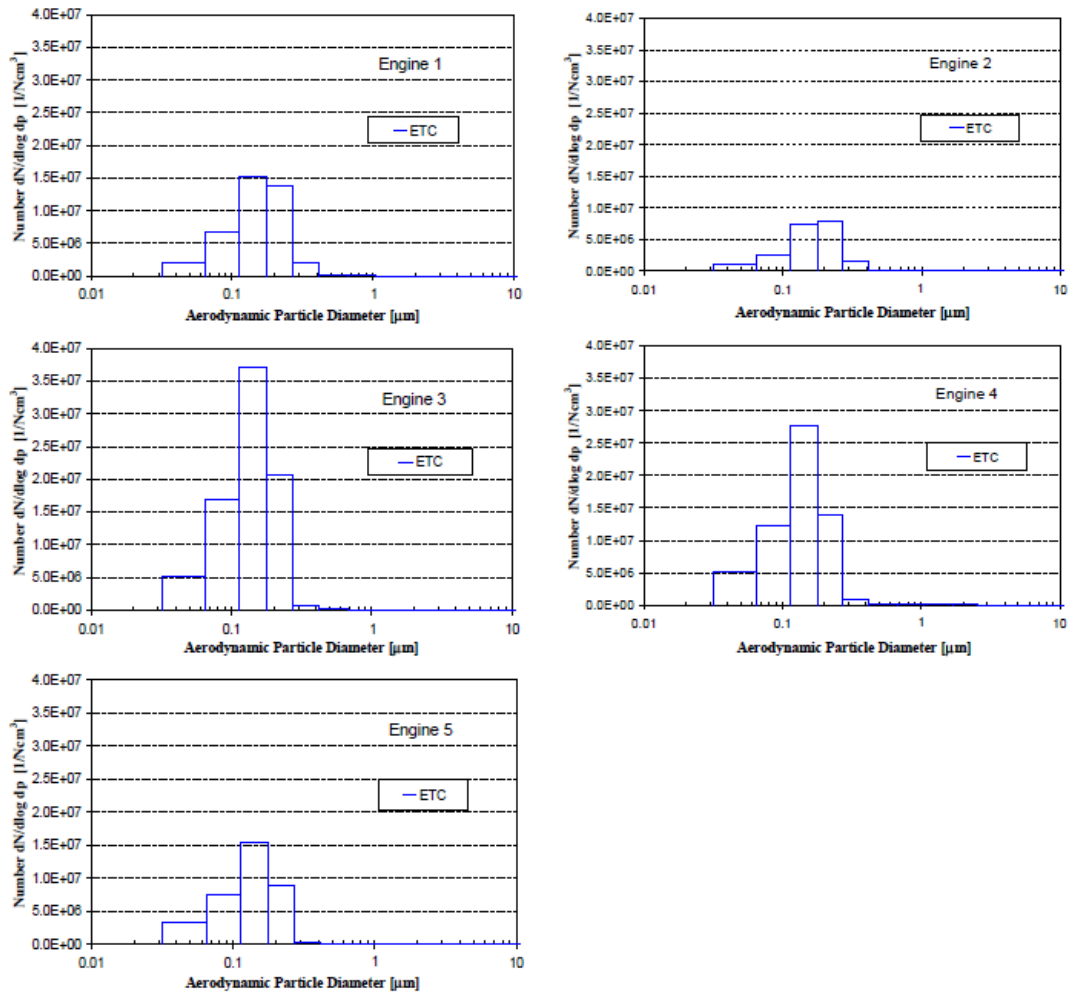


圖 2-13 使用不同引擎在歐洲暫態循環下微粒數量粒徑分布  
(Lehmann et al., 2003)

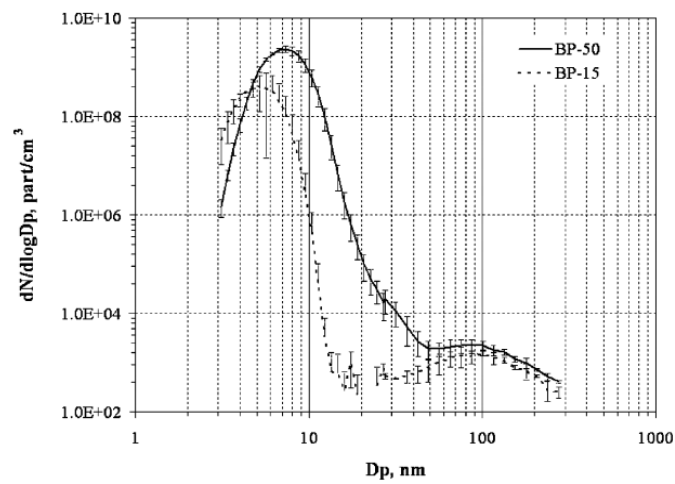


圖 2-14 含硫量 50 ppmv 和 15 ppmv 之微粒數量濃度粒徑分布  
(Grose et al., 2006)

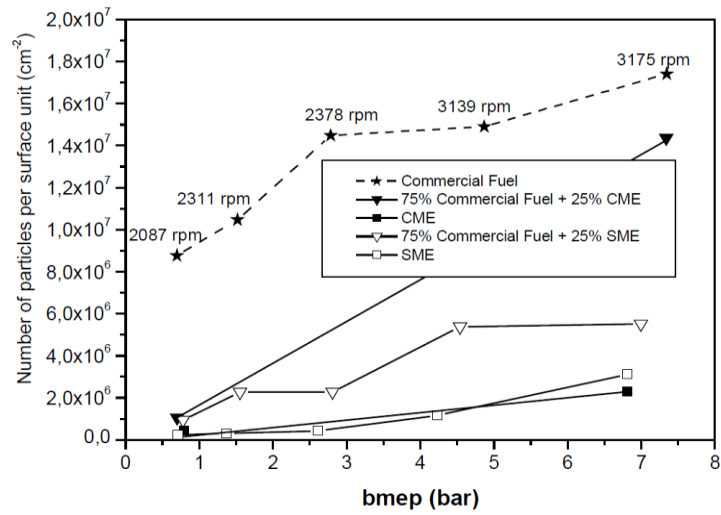


圖 2-15 使用一般柴油與不同比例、材料之生質柴油數量濃度

(Lepuerta, 2002)

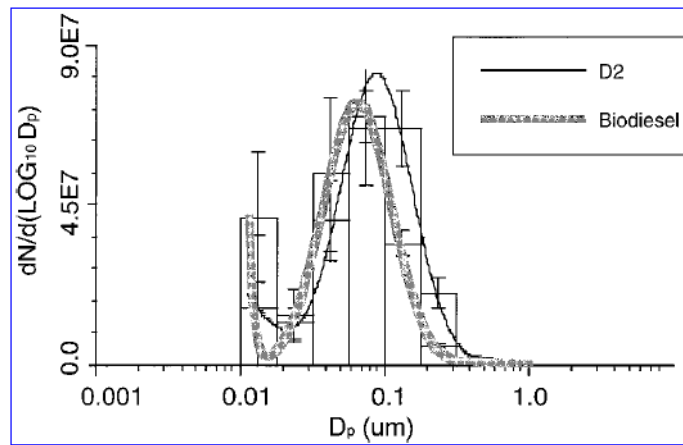


FIGURE 2. Particle size number distribution for D2 and biodiesel fuels at 100% load, 1500 rpm.

圖 2-16 一般市售柴油與生質柴油引擎排放之微粒數量濃度粒徑分布

(Bagley et al., 1998)

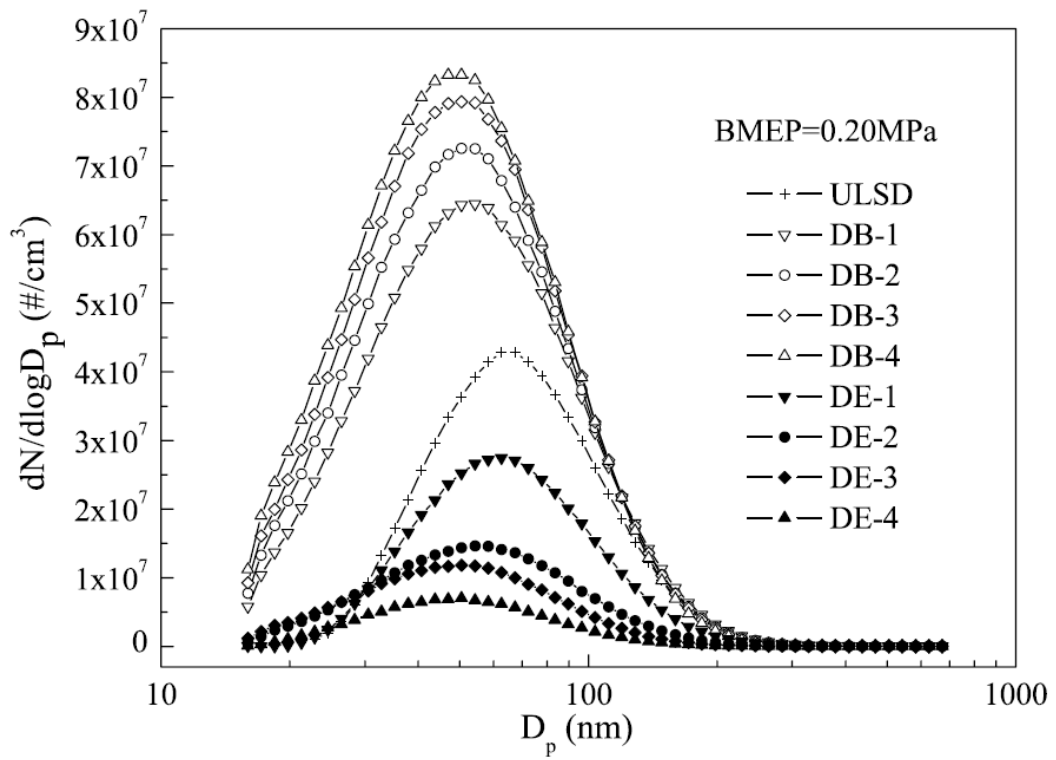


圖 2-17 超低硫柴油與添加不同比例生質柴油在低負載(0.2 MPa)之微粒

數量濃度粒徑分布

(Di et al., 2009)

## Diesel oxidation catalysts (DOC)

- Reduction of carbon monoxide and hydrocarbons by more than 90%
- Reduction of particulate emissions

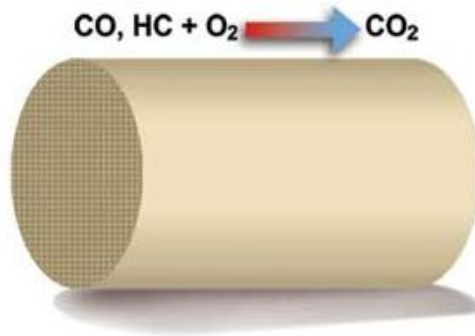
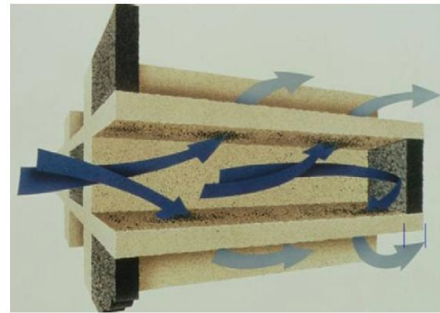


圖 2-18 氧化觸媒



(a) 壁流式(wall-flow)



(b) 直流式(flow-through)

圖 2-19 濾煙器 (Majewski, 2001)

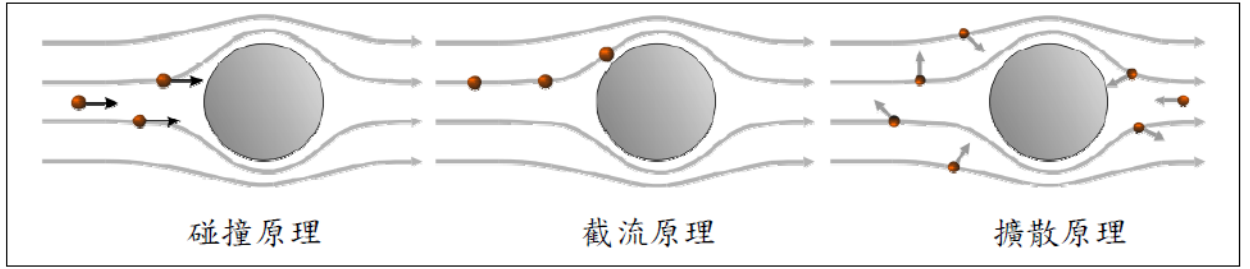


圖 2-20 濾芯材料捕集原理

(Majewski, 2001)

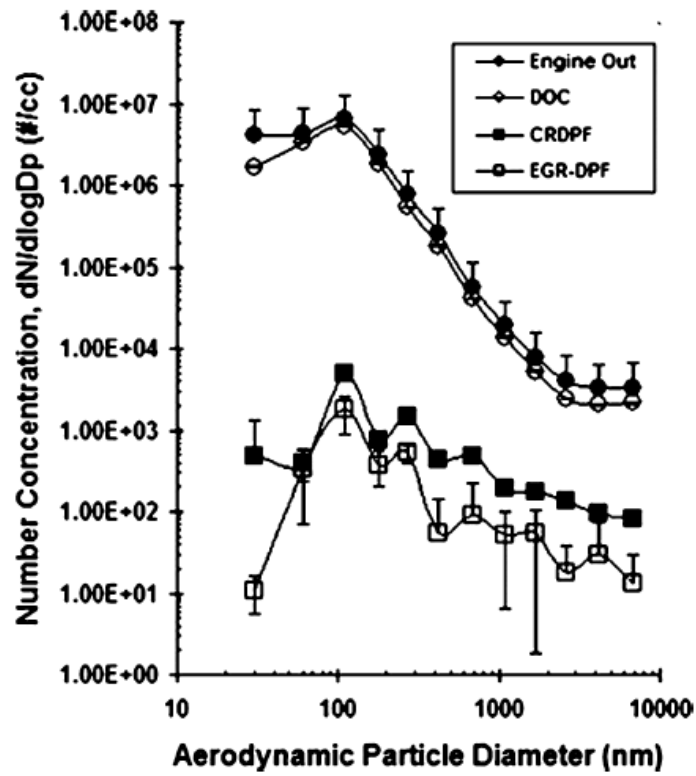


圖 2-21 使用不同後處理設備之微粒數量濃度粒徑分布

(Frank et al., 2007)



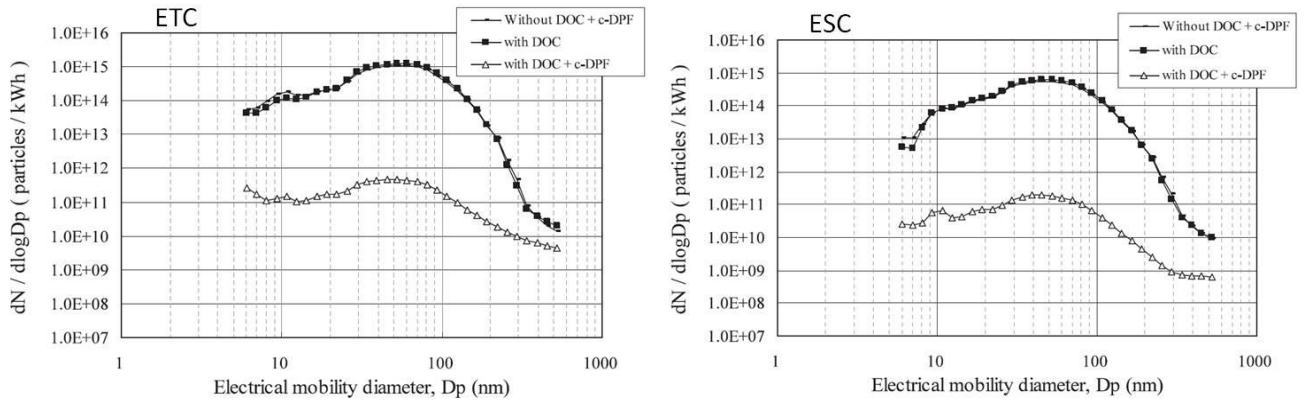


圖 2-22 使用 DOC 與 DOC+DPF 之微粒數量濃度粒徑分布

(Shibata et al., 2010)

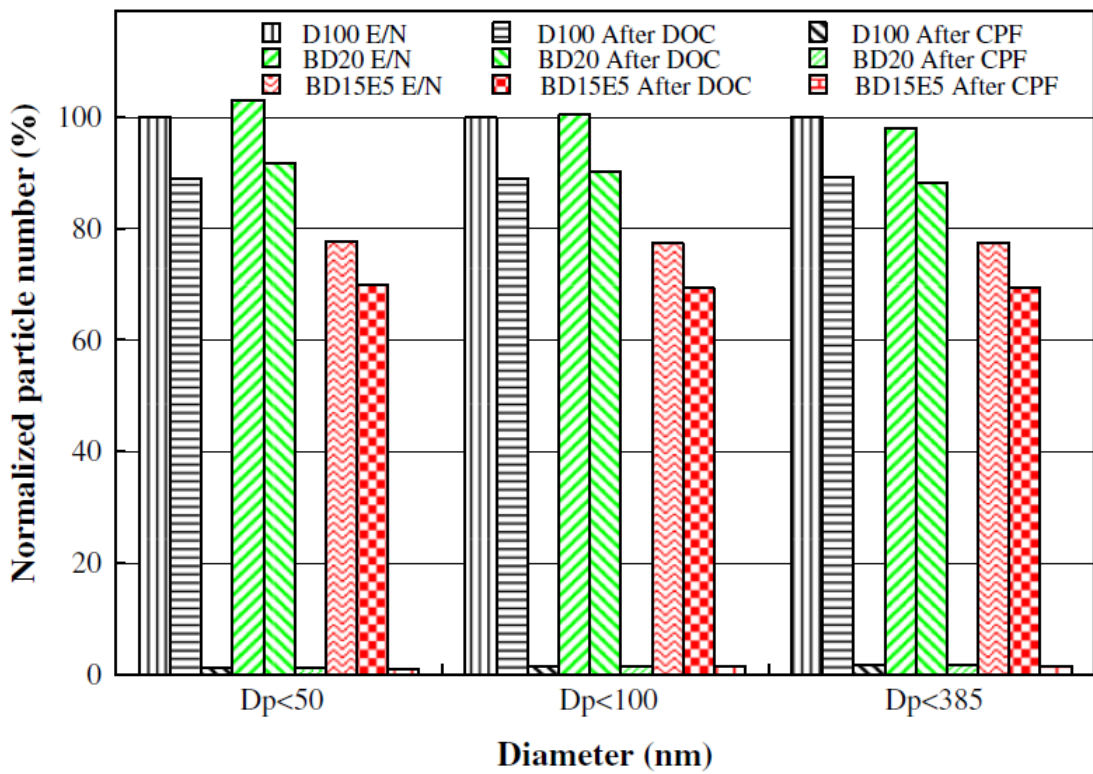


圖 2-23 不同油品在各粒徑下裝配 DOC 和 CPF 之微粒數量濃度

(Kim and Choi, 2010)

## 第三章 研究材料與方法

### 3.1 研究架構

本研究旨在探討不同控制技術對重型柴油引擎尾氣中次微米微粒數量濃度排放特性與粒徑分布，研究計畫整體架構如圖 3-1 所示。首先蒐集國內、外相關文獻對引擎尾氣中粒狀污染物進行初步瞭解後，進行採樣系統規劃與測試，並針對採樣系統進行品保品管確認後，於重型柴油引擎實驗室進行設備採樣、數據分析後，再與國內、外相關文獻進行比較，歸納最後分析結論。研究期程如表 3-1 所示，由 2009 年 7 月起進行文獻探討與採樣準備，期間分別針對研究參數進行為期 11 個月之採樣，再於其後數據處理和分析，進而撰寫論文與進行口試；總研究期程由 2009 年 7 月至 2011 年 6 月，合計 24 個月。

研究方法如圖 3-2 所示，重型柴油引擎於動力計依據不同操作循環進行不同控制技術採樣。引擎操作循環主要分為美國暫態循環(FTP)與歐洲穩態循環(ESC)兩種，引擎控制技術分為油品、負載、尾氣後處理設備與濾煙器再生之影響，依據不同操作循環分別進行相對應之採樣；採樣後進行數據處理、分析，獲得次微米懸浮微粒數量濃度與粒徑分布，進而計算排放係數與減量效率。詳細測試參數條件列於表 3-2，採樣油品有一般市售超級柴油(B1\_S50 和 B2\_S50)、超低硫柴油(B1\_S10)和添加不同比例之生質柴油(B10 與 B20)；控制技術主要分為氧化觸媒 (DOC)、

濾煙器(DPF)、氧化觸媒濾煙器(DOC+DPF)與不同規格之氧化觸媒器濾煙器分別如表中表示；在歐洲穩態循環中主要分 0、25 和 50% 負載進行測試。各種測試參數之表示法如表中第五欄所示。



## 3.2 受測引擎與控制技術

本研究測試所使用之引擎與柴油引擎尾器控制技術，包括各種油品與不同尾氣後處理設備，將於本章節詳細說明。

### 3.2.1 引擎規格

本研究使用之重型柴油引擎有兩具，廠牌與型號分別為日本日野(Hino)W06E 與美國康明斯(Cummins)B5.9-160 兩種，測試引擎之詳細規格列於表 3-3。第一具用於國立中興大學重型柴油引擎研究室進行歐洲穩態循環引擎測試。該引擎為直接噴射式(direct-injection)六氣缸引擎，屬於自然進氣，出廠年份為 1992 年，屬於台灣重型柴油引擎二期環保法規管制標準時期，氣缸尺寸(bore × stroke)為 104 mm × 118 mm，總排氣量(displacement)為 6014 c.c.，此引擎於 3000 rpm 可輸出最大馬力 121 kW，於 1600 rpm 可輸出最大扭力 363 Nm。第二具用於嘉義中國石油公司煉製研究所重型柴油引擎排污實驗室進行美國暫態循環測試。該引擎為直接噴射式六汽缸引擎，搭載渦輪增壓(TC)，出廠年份為 1996 年，符合臺灣重型柴油車引擎三期環保法規管制標準，汽缸尺寸為 102 mm × 120 mm，總排氣量為 5880 c.c.，此引擎於 2400 rpm 可輸出最大馬力 118 kW，於 1600 rpm 可輸出最大扭力 534 Nm。

研究使用之重型柴油引擎為二期及三期引擎，依據 TEDS7.0 對於台

灣地區各車種各年車齡分布統計，臺灣地區 80 年(第一期管制引擎)重型柴油車輛使用 10 年以上車輛所約占總一期車輛比例為 52%，由此可看出台灣地區使用一期管制標準之引擎比例還是占很大的比例，由此推估二及三期引擎使用率應高於一期管制標準，故本研究使用二及三期引擎測試引擎可符合台灣地區重型柴油引擎使用現況。

### 3.2.2 受測油品性質

柴油引擎依其使用燃料不同，影響引擎燃燒機制，進而造成引擎尾氣污染物排放之差異。因此研究中使用不同油品作為尾氣控制技術，須先對油品中之物化特性進行瞭解。本研究依不同採樣條件使用了一般市售超級柴油(B1\_S50 及 B2\_S50)、超低硫柴油(B1\_S10)及生質柴油(B10、B20)共五種油品來進行柴油引擎為氣排放數量濃度測試。由於採樣期間為環保署實施汽柴油成分管制期，因此研究所使用之一般市售柴油分為 B1\_S50 與 B2\_S50，B1\_S50 主要為含硫量  $< 50$  ppmw 且添加 1% 生質柴油之一般市售超級柴油，而 B2\_S50 為 99 年 6 月後使用之油品，則為添加 2% 生質柴油，用來瞭解台灣柴油引擎排放現況。B1\_S50 及 B2\_S50 主要之差異只有生質柴油添加比例，故油品特性主要以 B1\_S50 為代表，B1\_S50 之閃火點為  $79^{\circ}\text{C}$ 、密度為  $0.8386\text{ g/ml}$ 、動力黏度  $3.117\text{ cSt}$ 、含硫量為  $34.5\text{ ppmw}$  及氮氧芳香烴含量等，如表 3-4 所示。超低硫柴油



B1\_S10 為環保署民國 100 年即將實施加嚴車用汽柴油成分管制標準，含硫量小於 10 ppmw，閃火點為 72 °C、密度 0.8408 g/ml、動力黏度 2.925 cSt、含硫量 7.3 ppmw；相較於一般市售超級柴油閃火點、黏度與含硫量較低，密度則較高。生質柴油是以台灣新日化與鴻潔能源科技股份有限公司以廢食用油為原料所生產之 B100 生質柴油，其主要特性閃火點 185 °C，密度 0.8805 g/ml，動力黏度 4.359 cSt 與含硫量 2.1 ppmw；研究使用之 B10 與 B20 由 B100 與市售超級柴油以 1:9 與 2:8 比例調配而成。油品物理化學特性閃火點、密度與洞粒黏度隨著生質柴油添加比例而增加，含硫量則隨著生質柴油添加比例增加而減少。其餘物化特性與檢測方法詳列於表 3-4 中，包括總芳香烴含量、十六烷指數與熱值等柴油物化特性之基本參數比較。

### 3.2.3 尾氣後處理設備規格

尾氣後處理設備主要是裝設於引擎排氣管末端，用以控制引擎燃燒後產生之廢氣，故屬於末端管制措施。本研究使用之尾氣處理設備包括氧化觸媒(Diesel Oxidation Catalyst, DOC)、濾煙器(Diesel Particulate Filter, DPF)與氧化觸媒濾煙器(DOC+DPF)，進而測試不同規格與再生後之氧化觸媒濾煙器是否有影響。氧化觸媒濾煙器為國內康捷環保科技股份有限公司所生產之柴油尾氣後處理設備，平面圖如圖 3-3 (a)所示。主要由前

段擴散器、中段氧化觸媒(DOC)與後段柴油微粒過濾器(DPF)組成，各段以法藍片連接防止漏氣，實際設備則如圖 3-3 (b)、(c)與(d)所示，(b)為設備整體圖，(c)與(d)分別為觸媒濾材與濾煙器濾材。設備前段擴散器使柴油車尾氣在與氧化觸媒反應前進行擴散，使尾氣中污染物均勻分散，以利進入 DOC+DPF 後有效與氧化觸媒反應；氧化觸媒為使用鉑與鈀等貴金屬，將引擎排放廢氣中之碳氫化合物(HC)與一氧化碳(CO)氧化為水(H<sub>2</sub>O)與二氧化碳(CO<sub>2</sub>)；後端濾煙器為主動再生型，其濾材由高密度的堇青石(Cordierite)蜂窩陶瓷組成之過濾通道，主要的化學成分為二氧化矽(SiO<sub>2</sub>)、氧化鋁(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)與氧化鎂(MgO)，濾材為多孔圓柱型，每平方英寸有 100 個過濾孔，微粒以壁流式通過濾煙器被攔截吸附，外徑 240 mm、長度 305 mm，詳細之濾煙器規格與化學組成成分百分比列於表 3-5 與 3-6。

### 3.3 引擎操作條件

由於引擎排放之污染量受到引擎運轉條件之影響，測試時必須依照固定操作條件，故有賴於動力計進行調整。動力計(dynamometer)為控制與量測動力、扭力與馬力之設備，可藉由同時量測扭力與轉速(rpm)來計算引擎馬力，也可用於控制引擎扭力與動力。用於引擎操作測試之動力計主要有兩種，為將動力計直接結合於引擎上之引擎動力計(engine dynamometer)與利用滾筒、交流或直流馬達及慣性飛輪將車輛直接放於其上進行測試之底盤動力計(chassis dynamometer)。本研究主要利用引擎動力計來調整引擎之運轉，為電動馬達藉由磁場產生制動力來承受引擎的負載，再精確的量測動力計所承受的力矩(扭力)；且可於定轉速定扭力的情況下操作，因此可藉由人為控制操作來模擬行車型態運轉。本研究使用之柴油引擎動力計為德國制 Schenck GS-500 與 GS-350 直流式動力計，GS-500 為於中興採樣搭配 Engine1 使用，GS-350 為於中油採樣搭配 Engine2 使用。GS-500 及 GS-350 最大吸收功率分別為 500 kW 及 350 kW(1600-3500 rpm)，最大吸收扭力為 800 及 2000 Nm，最大無負荷轉速同樣為 4000 rpm，兩者動力計之正扭力至負扭力反應速度均小於 1 秒，所以可有效執行美國暫態循環(FTP)與歐洲穩態循環(ESC)運轉測試程序。

測試引擎在引擎動力計上(配合路阻模擬)進行固定運轉型態測試，

主要分為歐洲穩態循環、美國暫態循環與穩態三種行車型態測試，以下將對各運轉型態進行詳細之介紹。

### 3.3.1 穩態測試條件

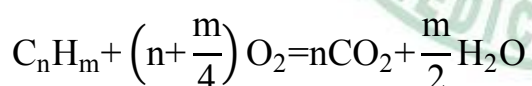
#### 不同負載

我國環保署於民國 96 年實施重型柴油車第四期排放標準同時採認美規與歐規排放管制及測試方法，因此本研究為了解重型柴油車於穩態測試時之污染物排放，主要使用歐盟(ECE regulation NO.49)規定於 1999/96/EC 中對於柴油車檢測設備與試驗方法，此測試運轉為西元 2000 年歐洲針對重型柴油引擎第三期管制標準所制定之新測試方法，分為歐盟穩態循環(European Stationary Cycle, ESC)、歐洲暫態循環(European Transient Cycle, ETC)及煙度測試(European Load Response, ELR)。而本研究使用之穩態測試為歐洲穩態運轉循環，如圖 3-4 所示。此測試是模擬一般營業用之柴油貨車(卡車)定速行駛於高速公路上之情形，依據駕駛習慣將引擎之轉速與負載區域分成 13 個最常發生之組合，並給予各狀態權重配比。此 13 個模式依據不同的穩定的引擎速度(engine speed)與負載(load)組成，第 1 個模式為惰轉運行 4 分鐘，其餘 12 個模式都運轉 2 分鐘。且依圖中各有不同比例之權重，權重較高者主要為占整體權重 15% 之第 1 個模式，及各占 10% 之第 3、4 及 9 模式；整個循環測試時間為



28 分鐘。每個測試條件都於暖車後進行測試，故為熱啟動(hot start)污染排放測試。

針對歐洲穩態循環 13 個模式，由於研究限制本研究主要於量測時選取模式 1、3 及 9 等 3 點進行測試；部分延伸至模式 4 和 8。主要包含了 3 種扭力條件，分別為 0、25 及 50% 負載，用以進行負載對於引擎排放污染物之比較。選點主要依據各模式所占之權重與實際測試之引擎狀態進行選取，由圖中可看出模式 1、3 及 9 所占之權重分別為 15%、10% 及 10%，此 3 點所占之比例為 35%，可顯示實際行車操作下 35% 之行車狀態，且涵蓋不同負載以利進行比較。本研究引擎運轉條件如表 3-7 所示，引擎轉速設定為 1800 rpm，扭力則分為 7、97.5 和 185.8 Nm 三種，引擎排氣溫度範圍為 73-308 °C。本研究之不同負載主要為扭力上之差異。理論上，燃料完全燃燒成 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O，其燃燒方程式如下：



假設柴油為 12 烷所組成(C<sub>12</sub>H<sub>24</sub>)，完全燃燒之空氣燃料(A/F)化學計量為 14.7，柴油引擎主要為燃料稀薄狀態下進行。因此針對本研究之 3 種不同負載，由 0、25 和 50% 負載其空燃比分別為 247、64 和 35。

### 不同轉速

本研究也針對穩態運轉測試，進行了惰轉、低轉速、中轉速及高轉



速四種測試循環，引擎運轉操作條件列於表 3-8。依照惰轉、低轉速、中轉速及高轉速轉速百分比分別為 0、25、51 及 80%，搭配負載情況分別為 0、40、50 和 50%，每組測試循環為 20 分鐘，每個測試條件進行 3 循環；進行測試循環時先進行暖機，故每一循環都由熱啟動(hot start)污染排放測試開始，3 筆數據平均得出穩態測試循環的排放係數，單位為 #/bhp-hr。

### 3.3.2 美國暫態測試條件

本研究利用非穩態之美國暫態循環(US Federal Test Procedure (FTP) heavy-duty transient test cycle)測試，依據美國 Code of Federal Regulations (CFR) Gaseous and Particulate Exhaust Test Procedures 所規定之運轉型態來模擬實際行車型態之污染物排放，且為國內三期(含)標準前對於重型柴油車排放尾氣之管制認證與稽查方法。其測試循環涵蓋各種引擎轉速及負荷狀況，此循環由四種實際路況測試下之柴油引擎運轉型態組成，分別為美國的紐約非高速公路(New York Non Freeway, NYNF)，代表典型較不擁擠之都市交通狀況，經常性的走走停停；與洛杉磯行高速公路(Los Angeles Non Freeway, LANF)，代表典型擁擠的都市擁擠交通情形，伴隨著些少許暫停和惰轉情形；和非高速公路(Los Angeles Freeway, LAFY)，模擬洛杉磯公路擁塞情況；最後在重覆紐約非高速公路完成一

個循環。其中每一循環耗時 1200 秒平均測試速度為 30 km/h，測試期間等同於重型柴油車輛行駛 10.3 km，平均負載因素(Load Factor)為最大馬力的 20-25%；在進行排放污染測試時，首先需進行一個循環之冷啟動測試(cold start)，隨後靜置 20 分鐘再進行另一個循環之熱啟動測試(hot start) 污染排放試驗，再依照 CFR 法規所規定之標準計算方法，分別乘上其權重(cold start : hot start = 1:6)得出其複合污染排放指數(emission index)，單位為 g/bhp-hr。其測試程序涵蓋各種引擎轉速及負荷狀況，模擬路況包括高速公路 (express way)，塞車市區 (congested urban) 及非塞車市區 (uncongested urban)，其測試曲線如圖 3-5 所示。



### 3.4 引擎尾氣採樣稀釋系統

微粒採樣受到溫度、流量與稀釋比等諸多因素影響，故須使用可控制環境與稀釋之系統進行量測。本研究主要使用之採樣稀釋系統為旋轉盤熱稀釋系統及定容積採樣系統兩種，兩採樣系統主要差異為旋轉盤熱稀釋系統進行樣本加熱，量測非揮發性微粒；定容積採樣系統未加熱樣本，因此量測為半揮發性氣態與固態微粒。兩採樣系統將於以下進行介紹。

#### 3.4.1 旋轉盤熱稀釋系統

本研究使用二期標準 Hino (Engine 1) 之重型柴油引擎乙部進行測試時，直接於引擎尾氣進行微粒量測，如圖 3-6 所示。引擎尾氣中直接連接旋轉盤熱稀釋系統(rotating disk thermodiluter)進行尾氣污染物濃度稀釋後；由於直接於引擎尾氣中進行採樣，引擎所排放之尾器流量遠大於稀釋系統所需之流量，且流速快，因此產生極大之正壓，故於引擎尾氣接稀釋系統管線間，裝設一球閥以確保通過進入採樣系統與儀器設備之引擎尾氣流量在控制範圍。經由稀釋後進入控制樣本溫度器控制溫度後，送往採樣儀器(SMPS+C)進行微粒採樣。由於旋轉盤熱稀釋系統需要採樣儀器採氣流量約 1.5 lpm，而本研究儀器提供 0.3 lpm 流量，故於連接控溫器與 SMPS+C 間之管線，裝設 T 型轉接頭，另一端連接採樣泵(pump)

使其流量達到稀釋系統所需範圍。

旋轉盤熱稀釋系統為偵測微粒濃度於特定條件下之採樣儀器，如圖 3-7 儀器實際圖所示。主要由旋轉盤稀釋器(rotating disk diluter)與後端連接溫控器組成，藉由旋轉盤稀釋器將欲採樣樣本稀釋至採樣儀器可量測範圍後進行採樣。旋轉盤熱稀釋器稀釋原理如圖 3-8 所示，主要藉由原採樣氣體與稀釋氣體兩道分開之氣體管線，由旋轉盤上之樣本盤(cavities)攜帶少量氣體，經由旋轉將攜帶樣本與經過濾材(filter)後乾淨之氣體稀釋混合後，送至後端樣本加熱器；此旋轉盤稀釋可將樣本與稀釋氣體於稀釋時控制溫度，可設定為不控制、80、120 與 150 °C 以避免樣本與稀釋氣體結合時冷凝影響微粒數量之量測。儀器搭配 2 個旋轉盤，分為 8 盤稀釋範圍為 1:150 to 1:3000 與 10 盤稀釋範圍為 1:15 to 1:150，本研究使用 10 盤(如圖 3-9)之旋轉盤且將稀釋氣體溫度設定為 80 °C。樣本經由加熱稀釋後，進入溫度控制器，其可將溫度加熱至 400 °C 進行量測，本研究主要將樣本加熱至 300 °C，去除揮發性物質進行固態微粒量測，且此為聯合國-歐盟(UN-ECE PMP)最新數量濃度量測採樣方法之標準規定。重型柴油引擎室實際採樣圖如 3-10 所示。

於旋轉盤熱稀釋系統下，各採樣條件之稀釋比例如表 3-9 所示，稀釋比範圍為 15-300 倍，此調整原則為在未裝設尾氣後處理設備之重型柴油引擎原尾氣，由於尾氣中污染物濃度較高，故使用高稀釋倍數進行



尾氣稀釋，約為 250-300 倍；而在裝設尾氣後處理設備後，由於尾氣中污染物濃度較低，故使用低稀釋倍數，約為 15 倍。

### 3.4.2 定容積稀釋系統

本研究選用三期標準 Cummins (Engine 2)之重型柴油引擎乙部進行測試時，尾氣取樣設備主要是藉由定容積稀釋(constant volume sampling)系統，定容積稀釋系統是一個量測引擎排放之氣態及粒狀污染物，如圖 3-11 所示。其原理為將欲採樣之氣體與乾淨空氣進行稀釋後，再用採樣袋收集部分氣體後，其餘則被排出取樣器後，由臨界流量文氏管(critical flow venturi, CFV)來計算流量。臨界流文氏管是以流體力學中關於臨界流動的原理為基礎，當氣流以音速流動時，可以保證流過的氣流恆定流量，其值與噴管前的絕對壓力和溫度有關，根據稀釋排氣要求設計的臨界流量文氏管，可以達到規定值的恆定設計流量。本研究中引擎排氣及稀釋空氣混合後之總容積固定，且連續式採樣蒐集並分析，而污染物質乃根據取樣氣體濃度或粒狀污染物採樣濾紙重量差異，及測試期間採樣系統總流量決定之。採用二階稀釋系統，能分別控制稀釋空氣流率在 4250、3000、2000、1000 cfm，主稀釋道(1st)內徑為 14 英吋，氣態污染物在主稀釋道中取樣，採樣溫度低於 191 °C；二次稀釋道內徑為 4 英吋，粒狀污染物於二次稀釋道(2nd)中取樣，採樣溫度低於 51.7 °C，採樣稀



釋倍數範圍為 17-33 倍。柴油引擎廢氣排出後導入稀釋管，稀釋氣體以 Spencer 鼓風機(4600 scfm,127Hp, 3550 rpm)由外界空氣引進，再經濾清器處理後導入稀釋道，整個尾氣稀釋系統。

針對本研究所使用之儀器，由於引擎廢氣所排放之數量濃度接近或超過儀器可量測極限，故於第一稀釋道後外加稀釋道進行採樣，如圖 3-12 所示。將引擎廢氣從第一稀釋道採樣口接到外加稀釋腔中，再於稀釋腔另一進氣口接上乾淨空氣使用流量計進行稀釋控制，使引擎廢氣於稀釋腔中混合後再進入採樣儀器中，外加稀釋倍數約為 1-10 倍。

本研究引擎尾氣經過 CVS 與外加稀釋後，稀釋倍數如表 3-10 所示，依照各採樣狀況進行調控，視其是否需要二次稀釋，整體二次稀釋後之倍數範圍為 100-300 倍。

### 3.5 微粒數量濃度粒徑分布量測儀器

針對柴油引擎尾氣數量濃度粒徑分布的量測，本研究使用掃描式電移動度分徑儀與凝結合計數器組合而成之系統(Sequential Mobility Particle Sizer, SMPS+C, GRIMM Model 5.500)圖 3-13。前者將微粒從進氣口吸入，在固定電壓電場環境下，利用不同粒徑微粒之電移動度在靜電脈衝分析儀(differential mobility analyzer, DMA)中，將微粒粒徑位於 10-1000 nm 範圍內的微粒，依序分為 44 個較小的區間，再將各個粒徑區間之微粒數量由後者計數，將通過 DMA 選取後之單粒徑微粒(monodisperse aerosol)通過攝氏 40°C 的加熱槽與飽合的正丁醇(n-butanol)蒸氣混合，再通過攝氏 15°C 的冷凝管，使得正丁醇氣體能夠凝結在微粒表面上，讓微粒粒徑能增大到約 20  $\mu\text{m}$ ，使微粒吸附增加其體積，再藉由微粒計數器(Condensation Particle Counters, CPC)使微粒進入雷射光學偵測計數微粒數，以雷射光照射微粒計數微粒數量，收集到之數據資料則儲存於電腦中，供後續統計分析。儀器數量量測上限為  $10^7 \text{ \#/cm}^3$ ，敏感度為  $1 \text{ \#/cm}^3$ ，而可量測之最小微粒直徑( $D_{50\%}$ )為 4.5 nm。收集到之數據資料則儲存於電腦中，供後續統計分析。儀器量測設定上，採樣與護套氣流流量分別為 0.3 與 3.0 L/min。

儀器掃描一筆數量濃度粒徑分布時間可選擇一般掃描(7 分鐘)或是快速掃描(3 分半鐘)。本研究依照實驗上需求，量測柴油引擎暫態循環，

其行車型態變化快速，故設定為快速掃描，於採樣後再將數據輸出建立成 Excel 檔做分析。

本研究也單獨使用凝結核計數器(CPC)進行時間-數量量測，量測反應時間為每秒一筆數據，可逐秒反應柴油引擎運轉操作條件之微粒排放數量濃度。



### 3.6 資料分析

本研究所量測到之微粒數量濃度( $N_0$ ，單位為 $\#/cm^3$ )為經過兩次稀釋後之結果；一次是在定容積系統中( $DR_1$ )，另一次是在微粒量測系統中( $DR_2$ )。因此，若第一稀釋道之氣體體積為 $V_1$ ，則第一稀釋道中之微粒數量濃度( $N_1$ )與引擎廢氣中所含之微粒數量( $Num$ ，單位為 $\#$ )可由下式求得：

$$Num = N_0 \times DR_2 \times V_1 = N_1 \times V_1$$

微粒數量排放係數(emission factor, EF)之常用單位為  $\#/bhp\text{-hr}$  與  $\#/km$ ，前者可藉量得之  $bhp\text{-hr}$  直接求得，後者則是利用估算之暫態循環行駛距離求得；由於暫態循環之平均行駛速度約為  $30\text{ km/hr}$ ，故在  $20\text{ min}$  測試時間內，其平均行駛距離約為  $10.3\text{ km}$  (Giakoumis and Alafouzos, 2009)。

依據美國 CFR Part 86 Subpart N 之相關規範，對冷啟動與熱啟動進行權重後，求其加權排放係數(weighted EF)，算式如下：

$$EF_{weighted} = \frac{1}{7} EF_{cold} + \frac{6}{7} EF_{hot}$$

$EF_{weighted}$ ：冷熱加權後之微粒數量濃度排放係數。

$EF_{cold}$ ：冷啟動所測得之微粒數量濃度排放係數。

$EF_{hot}$ ：熱啟動所測得之微粒數量濃度排放係數。

歐洲穩態循環由 13 種 mode 組成，各 mode 有其加權值，本研究採其中 mode 1、3 和 9 分別進行採樣，求其平均時，依其加權數值進行計算，算式如下：

$$N_{weighted} = \frac{1.5}{3.5} N_{0\%load} + \frac{1}{3.5} N_{25\%load} + \frac{1}{3.5} N_{50\%load}$$

$N_{weight}$ ：歐洲穩態循環 3 種 mode 測試下之微粒數量濃度加權平均。

$N_{0\%load}$ ：歐洲穩態循環 mode 1 (0% load) 測試下之微粒數量濃度。

$N_{25\%load}$ ：歐洲穩態循環 mode 9 (25% load) 測試下之微粒數量濃度。

$N_{50\%load}$ ：歐洲穩態循環 mode 3 (50% load) 測試下之微粒數量濃度。

減量效果是依據加權排放係數或濃度加以計算，如下：

$$\text{Reduction (\%)} = \frac{EF_{base} - EF_{case}}{EF_{base}} \times 100\%$$

$EF_{base}$ ：基準排放係數，亦即使用一般市售超級柴油 B1 或 B2 之微粒數量濃度排放係數。

$EF_{case}$ ：使用減量控制技術後之微粒數量濃度排放係數。

微粒損失主要藉由擴散、重力、慣性與靜電等損失，研究中由於採樣地點限制，儀器無法近距離架設於採樣口，因此增加管線長度會對微粒傳輸造成影響，對此本研究主要藉由 Baron and Willeke (2001) 經驗式對重力與擴散損失進行考量，



扣除因為重力所導致之微粒損失後之傳輸效率( $\eta_{grav}$ )公式如下計算：

$$\eta_{grav} = \exp\left[-\frac{4Z \cos \theta}{\pi}\right]$$

上式中， $\theta$ 為採樣管水平傾斜角度， $Z$ 為重力沉降參數，如下所示：

$$Z = \frac{L V_{TS}}{d U}$$

式中  $L$  與  $d$  分別為圓管的長度和直徑， $V_{TS}$  是微粒終端沉降速度， $U$  是平均流速。

扣除因為擴散所導致之微粒損失後之傳輸效率( $\eta_{diff}$ )公式如下計算：

$$\eta_{diff} = 0.819 \exp(-11.5\mu) + 0.0975 \exp(-70.1\mu)$$

上式中， $\mu$ 為擴散損失參數，如下所示：

$$\mu = \frac{DL}{\pi d^2 U_i} = \frac{DL}{Q}$$

式中  $D$  為擴散係數， $L$  與  $d$  分別為圓管的長度和直徑， $U$  是平均流速， $Q$  是平均流量。

針對同條件下之 3 次採樣與不同天相同條件之採樣再現性，於 3 次採樣之差異，主要使用相對標準偏差(Relative standard deviation, RSD)為差異指標，而不同天相同條件採樣則使用相對差異百分比(RPD)為指標，

相對標準偏差(RSD)公式如下：

$$RSD(\%) = \sqrt{\frac{SD}{mean}} \times 100$$

式中 SD 為標準差，公式如下：

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$$

相對差異百分比(RPD)公式：

$$RPD(\%) = \frac{|A - B|}{AB} \times 100$$

式中 A,B 分別為不同天測得值。



### 3.7 品保品管

品質為提供樣本採樣與數據可靠性之依據，品質保證(quality assurance, QA)為產生樣本採樣、分析與品管等之有效數據過程，以保證此過程妥當實施，可有效產生所需品質；品質管理(quality control, QC)為達到品質要求所採取之一切作業技術及活動，用來保障所獲得之數據為有效。本研究品保品管包括採樣適當記錄、保證採樣儀器正常運作、採樣系統損失修正措施、採樣間數據查驗與比較與採樣條件之比較。如圖 3-14 所示，採樣儀器例行維護與保養、採樣系統/微粒損失率計算、重覆量測之再現性測試與稀釋比例測試進行確認，以下將針對各項進行細部探討。

#### 3.7.1 例行維護與保養

由於本研究為現場採樣，包含多種採樣條件與採樣期間，為了確保採樣過程與收集樣本之可追溯性(traceability)，採樣進行時會針對採樣日期、採樣地點、採樣條件與儀器狀況等各種變項進行確實記錄，以利採樣後之數據整理分析查驗，且也提供日後追溯之依據。

採樣測定之儀器設備都需要內部與外部之校正與維護，本研究使用之量測儀器 SMPS+C 在儀器本身維護保養上，由於內部精密構造及電子設備，每年都會送回德國 GRIMM 原廠進行保養維護與校正，以確保量

測儀器內部之品質。儀器之外部校正與維護包括衝擊板清理(cleaning the impactor)、洩漏測試(leak test)、零點測試(zero test)與氣流流量測試。由於篩選微粒粒徑大小，SMPS+C 採樣口備有一衝擊板(impactor)，先行過濾較大之微粒，衝擊板於每次採樣後，視儀器內部壓力值(> 100%)，進行清理；所先拆除裝設於儀器上衝擊板，使用無塵紙擦拭附著於其上之污垢與潤滑油，使其上面無污垢或紙屑殘留後，使用乾淨衝擊板潤滑油約 0.1 到 0.2 mm 薄膜擦拭於衝擊面上，將其裝回儀器中以確保衝擊板上不至累積太多微粒。

量測微粒數量其對環境中微粒屬非常敏感，儀器如有洩漏將會影響採樣數值之可靠度，故針對儀器洩漏進行洩漏與零點測試，洩漏測試使用壓力洩漏測試器(pressure leakage tester)，將其連接於採樣出口端，將儀器其餘開口封閉，打入空氣至壓力值達到 2 torr 後，觀察半分鐘，當壓力不變則表示儀器無洩漏之虞；採樣期間針對 DMA、CPC 與兩者組合 SMPS+C 進行洩漏測試，測試結果顯示儀器未有洩漏。另一洩漏測試為零點測試，除了可確認儀器無洩漏外，還可確保 DMA 內部乾淨無污染；於採樣儀器採樣口接上高效濾粉塵過濾器(high efficiency particulate air, HEPA)，待穩定後觀察其測得數值是否 $< 1 \text{ \#}/\text{cm}^3$ 以確認採樣儀器系統乾淨無洩漏。於研究期間分別 SMPS+C 組合與單獨使用 CPC 進行零點測試，其測量結果均 $< 1 \text{ \#}/\text{cm}^3$ ，顯示採樣儀器無洩漏之虞。

微粒採樣氣流流量對儀器截取微粒粒徑有決定性的影響，故採樣儀器須符合其要求之採氣流量，本研究使用儀器 SMPS+C 之組合儀器要求之流量為 0.3 L/min，單獨使用凝結合計數器(CPC)一般與高流量要求為 0.3 與 1.5 L/min，故於採樣期間針對儀器採樣流量使用紅外線皂泡流量計 (air flow calibrator, Sensidyne Gilibrator-2) 進行測定，確保儀器採氣流量符合所要求及產生數據品質。儀器採樣氣流流量測定結果顯示 SMPS+C 組合之流量穩定且平均為 0.31 ( $\pm 0.013$ ) L/min；單獨使用 CPC 測定結果穩定且平均一般與高流量分別為 0.30( $\pm 0.003$ )與 1.48 ( $\pm 0.014$ ) L/min。結果顯示，採樣儀器氣流流量穩定且符合儀器應有採氣流量。

### 3.7.2 採樣系統微粒損失率計算

採樣系統方面，採樣管線長短對於微粒傳輸有重要影響，管線長度增加將使微粒沉積增加導致採樣損失增加；本研究於定容積採樣系統 (CVS)採樣時由於採樣地點限制，儀器無法架設於距離採樣口較近之位置，故採樣進行時需延長架設管線來進行採樣，此方面損失本研究先依據 Baron and Willeke (2001)進行微粒管線損失之理論計算，微粒損失主要藉由擴散、重力、靜電和慣性損失；而針對本研究管線中損失著重於擴散與重力，故依據各不同粒徑分別進行擴散與重力損失計算，公式如 3.7 章節，再於實驗室中進行實際測試比較。另一實驗系統直接於引擎尾氣採



樣，場地允許採樣儀器於採樣口進行採樣，因此視此採樣無額外多餘管線之損失。但此採樣使用稀釋儀器為熱旋轉盤稀釋系統，此儀器使用一連接管將廢氣於稀釋後送至後端加熱器在進入採樣儀器，而此連接管長度為 300 公分，故針對此管線也進行了擴散與重力損失計算。

旋轉盤熱稀釋系統採樣管線微粒損失，本研究先依據 Baron and Willeke 經驗式進行計算，其結果如表 3-11 所示，於 11.1 nm 部分有最大的損失 16%，其後隨著粒徑增大損失隨之變小，到了 51.3 nm 損失即 < 5%，其損失可忽略不計。損失粒徑分布如圖 3-15(a)，可看出各粒徑損失都在 17% 以下，總數量(不分粒徑)平均損失只有 4%；且此熱旋轉稀釋系統其管線之損失已於儀器本身稀釋倍數進行修正，故使用此採樣系統損失將於數據處理時進行稀釋倍數調整而不進行損失之調整。

定容積採樣系統(CVS)採樣管線微粒擴散與重力損失，結果如表 3-12，表中顯示微粒擴散、重力傳輸效率及包含兩者之傳輸效率，可看出微粒於粒徑 11.1 nm 傳輸效率最低，其表示在此粒徑有最大的傳輸損失 15%，其餘粒徑則都在 10% 以內，且在 11.1 nm 以上，隨著粒徑變大損失變小；至 521 nm 時，才有些微變大的趨勢，其主要為大粒徑受重力影響，故於 521 nm 後損失有增加的趨勢，總數量(不分粒徑)平均損失約為 13%。再於研究室中進行管線架設與稀釋實際測試，測試結果顯示於未接管線時，採樣微粒平均數量濃度為  $30684 \text{ \#/cm}^3$ ，而在經過採樣管線與稀釋後為

25440 #/cm<sup>3</sup>，顯示微粒數量損失 17%。粒徑分布方面，理論結果與實驗結果顯示如圖 3-15(b)，理論結果如上述表 3-10 之結果，實際測試結果在 11 nm，有 43%的損失，其後隨著粒徑有小幅度增高或降低，但整體上看來還是有隨著粒徑損失減少之趨勢；但在 100 nm 以上之微粒有些增量有些減量，且變化幅度相當大，其為實驗室實際測試變數大且經過稀釋，故數據差異性較大。若排除實際測試之變異性，由圖中可看出理論值與實驗值結果有相同的趨勢，故在採樣後本研究所測得微粒數量濃度均有依照粒徑理論損失進行微粒損失的調整，即為引擎廢氣中所排放之數量濃度。

### 3.7.3 量測再現性測試

採樣系統同天採樣多筆數據與不同天數據之一致性，仰賴重覆量測之再現性進行採樣系統與採樣儀器品保品管確認。本研究採樣使用儀器 SMPS+C 進行微粒數量濃度計數與粒徑分布掃描，每筆掃描時間為 3 分半鐘，於每個實驗條件參數進行 3-6 次不等掃描，其同一實驗參數下各筆掃描數據之相對標準偏差(RSD)可用來看本次實驗參數之”組內”再現性，表示同一天之採樣系統與量測設備穩定性；而不同天同實驗參數採樣之 RSD 則用來”組間”再現性，表示不同天採樣系統差異變化量以顯示比較性。

美國暫態循環測試中，每個實驗參數之掃描次數與 RSD 於結果表 3-13 中呈現，由表中看出其相對標準偏差範圍為 46-148%，顯示相同實驗測試條件中，不同筆之掃描數據具有一定的差距，其原因為美國暫態循環 20 分鐘內不斷變化行車型態因而造成污染物排放量差異，而每筆掃描(3.5 分鐘)所量測得之排放尾氣也不盡相同，因此本身即會具有相對程度的變異性。而由於採樣限制，美國暫態循環每種實驗條件參數只能進行一次循環測試，故缺乏組間再現性之數據。

於熱旋轉稀釋器進行之穩態採樣，每一實驗參數都進行 3 次掃描，其組內相對標準偏差以市售超級柴油(B2)未裝設尾氣後處理設備之採樣進行再現性確認，結果如表 3-14。由表中看出各採樣參數之數量濃度相對標準偏差都 $< 5\%$ ，可知引擎在穩態運轉測試下各採樣參數之數量濃度組內再現性良好。而相同條件下，不同天採樣之組間再現性如圖 3-16 所示，各組間相對標準偏差 $< 18\%$ ，顯示不同次引擎採樣會有些許不同。而粒徑分布方面，如圖 3-17 所示，(a)和(b)圖分別為使用一般市售超級柴油在引擎負載 25 和 50%條件下，不同天 3 次採樣之粒徑分布，每次為三個掃描之平均，可看出三次掃描之標準差很小，顯示三次掃描之組內再現性良好。由圖中可看出不同次採樣在(a)圖中除了數量上的差異外，在粒徑分布沒有明顯之差異；而(b)圖顯示，除了波峰位置有 7 nm 左右的差異，其粒徑分布形狀也無明顯差異。結果顯示不同次採樣對於粒徑影響上，

除了在波峰位置與濃度有些許差異外，粒徑分布形狀維持良好的再現性。

綜合上述結果顯示，引擎在暫態運轉條件時，由於暫態運轉變異性大與研究限制，故在再現性討論上較為困難；反之，穩態運轉條件下，各採樣條件持續運轉穩定數據再現性良好，相同條件不同次採樣則有些許之變異。

#### 3.7.4 稀釋比例測試

引擎採樣使用稀釋系統來調整不同稀釋倍數，然而微粒數量濃度對稀釋非常敏感，不同稀釋比例會造成微粒氣固項改變，進而影響微粒數量之計數與粒徑分布情形，故於採樣中盡量保持固定之稀釋比來維持數據之可比較性；但由於量測儀器與不同引擎操作參數之限制，本研究設定稀釋比例範圍從 15 到 300 倍。為了確認稀釋比例是否對本研究之數據造成影響，於研究中同一狀態下，進行不同稀釋比例量測。

為確認稀釋倍數是否對本研究之數據造成影響，於添加 10% 生質柴油(B10)怠轉條件下，進行了三種稀釋倍數測試，分別為 214、250 和 300 倍。圖 3-18(a)顯示使用不同稀釋倍數於同操作條件下進行採樣之數量濃度結果，看出未修正稀釋倍數之數量濃度依 214、250 和 300 倍分別為  $2.57 \times 10^5$ 、 $2.18 \times 10^5$  和  $1.85 \times 10^5 \text{ \#/cm}^3$ ，而圖上 N\* 為依照其稀釋倍數修正後之



濃度。以稀釋 300 倍之樣本為基準，可算出 214 和 250 倍之相對差異百分比分別為 0.9 與 2.1%，此結果顯示於高稀釋倍數下此系統仍能維持良好之精確度。

圖 3-18(b)為未修正稀釋比例之微粒數量粒徑分布，由圖中可看出不同稀釋比例除了對於濃度上有差異之外，在粒徑分布上幾乎毫無改變，都呈現雙峰分布，主要波峰位於 14.5 nm，另一次要波峰強度較弱，故於圖上放大來看大致上位於 62.8 nm，除了稀釋倍數 250 倍之次要波峰有些微差異位於 82 nm，但造成此之主要原因為數量濃度相近，故有此偏差。因此，扣除數量濃度太低所產生之偏差後顯示，不同稀釋倍數之粒徑分布一致，顯示，此稀釋系統稀釋倍數調整不會造成微粒數量濃度粒徑分布之改變。

綜合上述品保品管事項，採樣儀器之維護保養與校正可確保儀器於採樣時發揮正常之效用；而在定容積採樣系統微粒總數量平均損失為 13%，且採樣後之數量濃度依其粒徑大小進行損失修正，旋轉盤熱稀釋系統之損失則不進行額外稀釋修正；在歐洲穩態採樣同天數據再現性非常好，不同天採樣則有些許之變異；旋轉盤熱稀釋系統調整不同稀釋倍數，其數量濃度與粒徑分布仍能維持良好之準確度。



表 3-1 研究期程

時間(年份)	2009						2010												2011								
時間(月份)	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7		
工作項目																											
文獻探討	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■						
採樣準備	■	■	■							■	■	■	■	■	■	■	■										
採樣時間		■									■	■				■	■	■	■	■	■	■	■				
數據分析			■	■	■	■					■	■	■	■			■	■	■	■	■	■	■	■	■		
論文撰寫																			■	■	■	■	■	■			
論文口試																								■	■		
論文修改																								■			

表 3-2 測試參數

測試循環	油品	控制技術	行車型態 (load)	表示法
FTP	B1(S50)	×	×	B1_S50
FTP	B1(S10)	×	×	B1_S10
FTP	B10	×	×	B10
FTP	B1(S50)	DOC	×	B1/DOC
FTP	B1(S50)	DOC+DPF	×	B1/DOC+DPF
USC	B2(S50)	×	0, 25, 50%	B2_S50
USC	B10	×	0, 25, 50%	B10
USC	B20	×	0, 25, 50%	B20
USC	B2(S50)	DOC+DPF	0, 25, 50%	B2/DOC+DPF
USC	B10	DOC+DPF	0, 25, 50%	B10/DOC+DPF
USC	B20	DOC+DPF	0, 25, 50%	B20/DOC+DPF
USC	B2(S50)	DPF	0, 25, 50%	B2/DPF
USC	B2(S50)	DOC+DPF(new)	0, 25, 50%	B2/DOC+DPF <sub>n</sub>
USC	B2(S50)	regeneration: diesel	0, 25, 50%	

表 3-3 引擎規格

項 目	規 格	
引擎族 (Engine Model)	Hino	Cummins
引擎型式 (Engine Type)	W06E	B5.9-160
出場年份 (Year)	1992	1996.2.5
汽缸數 (Cylinder Number)	6	6
進氣型式 (Aspiration)	自動進氣(N)	渦輪增壓 (TC)
中間冷卻器 (Intercooler)	水冷	水冷
噴油燃燒型式 (Injection Type)	直接噴射式 (DI)	直接噴射式 (DI)
汽缸尺寸 (Bore x Stroke)	104 mm × 118 mm	102 mm × 120mm
總排氣量 (Displacement)	6014 c.c.	5880 c.c.
點火順序 (Injection Sequence)	1-4-2-6-3-5	1-5-3-6-2-4
點火角度(Injection Timing)	15 DEG	12.3 DEG
壓縮比 (Compression Ratio)	17.9 : 1	17.9 : 1
惰速轉速 (Idle Speed)	750 rpm	810 rpm
最大馬力 (Max. Power)	121kW@3000 rpm	118kW@2400 rpm
最大扭力 (Max. Torque)	363Nm@1600 rpm	534Nm@1600 rpm
管制期別 (Phase)	II	III

表 3-4 油品物理化學特性

分析項目	單位	油品					高級柴油	試驗方法	
		B1_S50	B1_S10	B5	B20	B100	規範值	CNS	ASTM
密度	@15.5 °C, g/ml	0.8386	0.8408	0.8441	0.8520	0.8805	Report	14474	D4052
閃點	°C	79	72	96	99	185	52, min	3574	D93
水分及沉澱物	vol%	0.000	0.005	0.030	0.000	0.000	0.05, max	6358	D2709
動力黏度	cSt@40 °C	3.117	2.925	3.504	3.592	4.359	1.9~4.1	3390	D445
灰份	Wt%	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.01, max	3576	D482
含硫量	ppmw	34.5	7.3	24.0	15.0	2.1	50, max	13877	D2622
銅片腐蝕性	3hr@50 °C	1a	1a	1a	1a	1a	No.1	1219	D130
流動點	°C	-9	-7	0	3	9	-3, max	3484	D97
藍氏殘碳量	wt%	0.07	0.05	0.08	0.07	0.09	0.1, max	3776	D542
顏色		1.0	0.5	-	-	-			
十六烷指數		53.5	-	55.0	55.0	48.0	48, min	12016	D976
多環芳香烴	Wt%	6.0	4.3	Nr	Nr	Nr	-		D6591
總芳香烴	Wt%	28.2	30.0	Nr	Nr	Nr	-		D6591
含氮量	Wt%	0.55	-	0.55	0.52	0.54	-		元素分析
含碳量	Wt%	84.95	86.22	83.74	82.39	75.87	-		元素分析
含氫量	Wt%	13.46	13.29	14.40	14.11	12.17	-		元素分析
淨熱值	Cal/g	10259	10244	10153	9965	9516	-		
蒸餾溫度	°C(95vol%)	349.3	349.8	354.4	353.0	337.2	338, max		
脂肪酸甲酯含量	vol%	1.23	1.11	-	-	-			
潤滑油	Mm	486.0	-	188.0	201.0	213.0	(460, max)	CEC F-06-A-96, HFRR	

表 3-5 濾煙器規格

項目	單位	型號
主晶相含量	%	≥85
孔數	孔/inch <sup>2</sup>	100
壁厚	Mm	0.7±1%
開孔面積	%	65
容重	g/cm <sup>2</sup>	0.5
氣孔率	%	45-50
微孔孔徑	μm	2-3
吸水率	%	25-30
膨脹係數	10-7/(800 °C)	15-18
軟化溫度	°C	1360
抗壓強度	MPa	A 向 ≥12 B 向 ≥4
比表面積	m <sup>2</sup> /g	5-10
外型尺寸	mm	圓形 外徑 240±1.5 高度 305±1%



表 3-6 濾煙器化學組成百分比

化學成分	組成百分比
SiO <sub>2</sub>	50±1%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35±1%
MgO	15±1%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0.55%
CaO	<0.5%
N <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	<0.3%

表 3-7 歐洲穩態測試引擎操作參數(旋轉盤熱稀釋系統)

ESC mode	Load (%)	Torque Nm	Speed Rpm	EGT °C
1	0	7.0	1800	73
9	25	97.5	1800	211
3	50	187.8	1800	308
-----				
4	75	292.5	1800	428
8	100	385.7	1800	600

表 3-8 穩態測試操作參數(定容積稀釋系統)

測試條件	引擎轉速 Rpm	轉速百分比 %	引擎負載 Nm	負載百分比 %	輸出功率 kW
惰轉 (Idle)	810	0	2	0	0.5
低轉速 (L speed)	1200	25	210	40	26.4
中轉速 (M speed)	1635	51	255	50	43.7
高轉速 (H speed)	2065	80	255	50	55.1

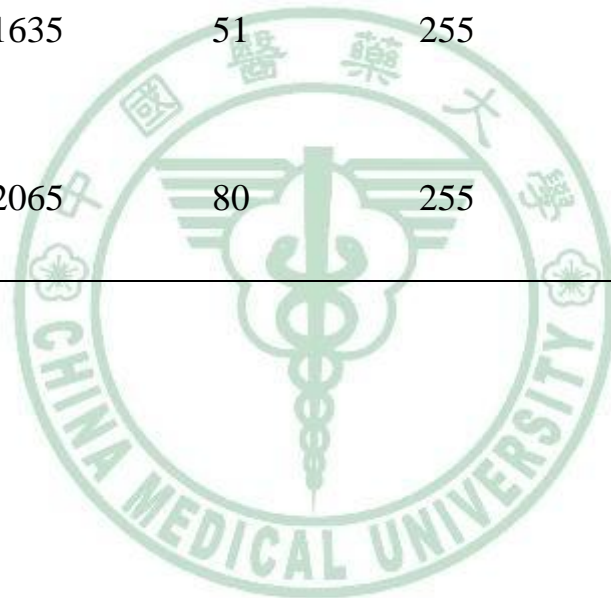


表 3-9 旋轉盤熱稀釋系統各採樣條件下稀釋比

Aftertreatment	Fuel Load	B2	B10	B20	B2_DPF	B2_DOC+DPFn
			dilution ratio			
✘	0%	250.0	254.8	300.0	300.0	300.0
✘	25%	250.0	300.0	300.0	250.0	300.0
✘	50%	250.0	300.0	300.0	250.0	300.0
✘	75%				250.0	300.0
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>						
✓	0%	15.3	15.3	15.3	15.0	15.0
✓	25%	15.3	15.3	18.8	15.0	15.0
✓	50%	15.3	15.3	15.3	15.0	15.0
✓	75%				15.0	15.0
✓	100%				15.0	15.0
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>						
✘	Mean	250.0	284.9	300.0	262.5	300.0
✓	Mean	15.3	15.3	16.5	15.0	15.0

表 3-10 CVS 採樣稀釋系統各採樣條件下稀釋比

Dilution	B1		S10		B10		B1/DOC		B1/DOC+DPF	
	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd
Cold	17.5	5.9	17.6	8.9	32.1	8.9	17.6	-	21.4	8.0
Hot1	17.6	5.9	17.7	8.9	31.9	9.9	17.8	-	21.1	8.0
Hot2	17.7	6.1	17.7	8.9			17.7	-	21.7	8.0
Hot3	17.7	6.1	17.7	8.9			17.8	-	21.4	8.0
Hot4							17.7	-	21.5	8.0
Hot5							18.3	5.9	21.4	8.0



表 3-11 不同粒徑微粒於旋轉盤熱稀釋系統管線中之傳輸效率理論值計算

粒徑(nm)	擴散損失後傳輸效率	重力損失後傳輸效率	總傳輸效率
11	0.920	1.000	0.920
21	0.963	1.000	0.963
51	0.988	1.000	0.988
101	0.995	1.000	0.995
214	0.998	0.999	0.997
307	0.998	0.999	0.997
521	0.999	0.997	0.996
1083	0.999	0.988	0.988

表 3-12 不同粒徑微粒於採樣管線中之傳輸效率理論值計算

粒徑(nm)	擴散損失後傳輸效率	重力損失後傳輸效率	總傳輸效率
11	0.849	1.000	0.849
21	0.931	1.000	0.931
51	0.978	1.000	0.978
101	0.990	0.999	0.990
214	0.996	0.998	0.994
307	0.997	0.997	0.994
521	0.998	0.992	0.990
1083	0.999	0.970	0.969

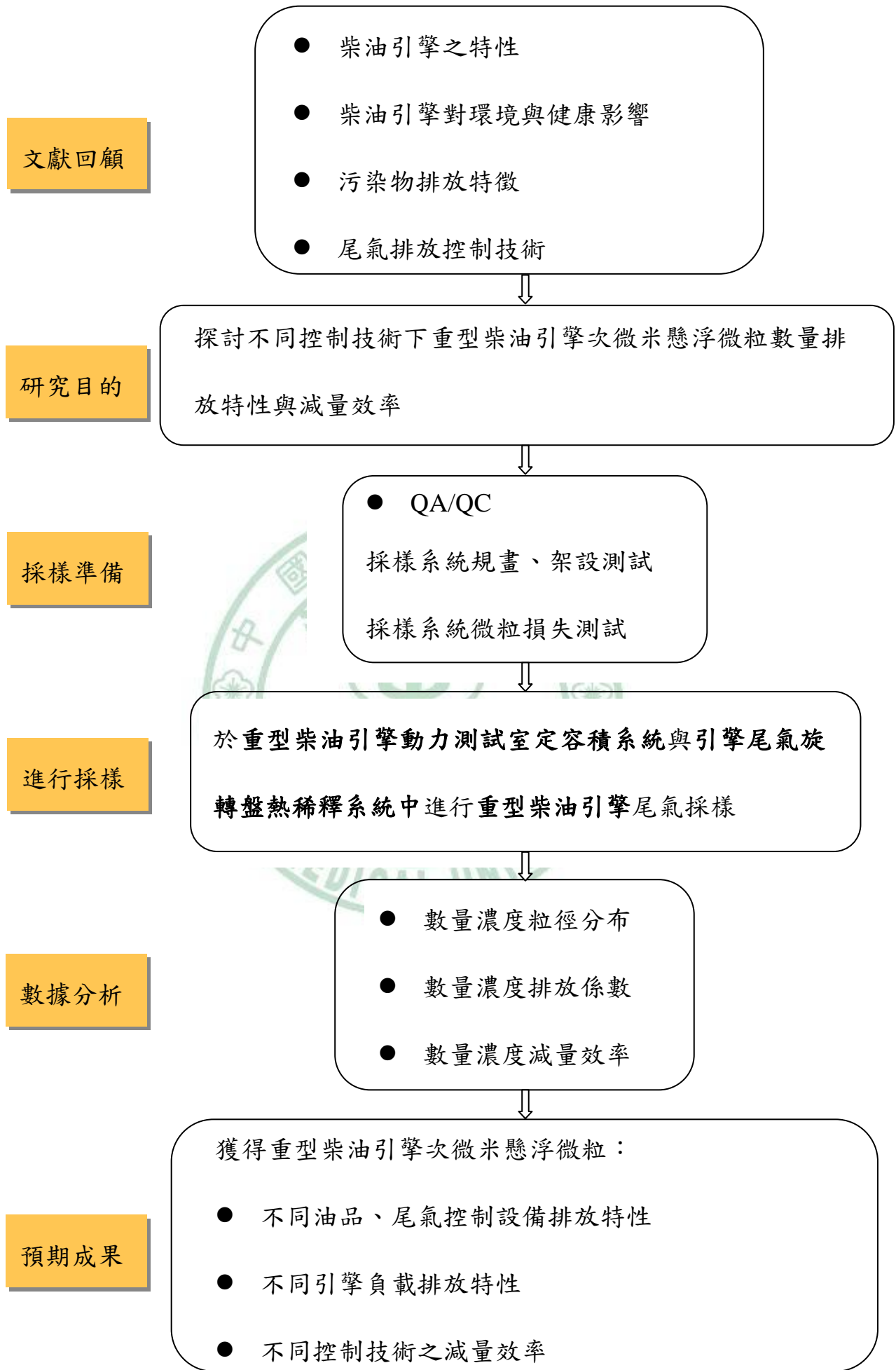


表 3-13 美國暫態循環同一引擎測試條件下，微粒數量濃度樣本數與組內相對標準偏差

Engine start	B1_S50		B1_S10		B10		B1/DOC		B1/DOC+DP F	
	n	RSD (%)	n	RSD (%)	n	RSD (%)	n	RSD (%)	n	RSD (%)
Cold	3	46	5	73	5	59	3	88	5	111
Hot	1	98	1	66	5	96	2	84	15	148
	5		5				8			

表 3-14 同一引擎測試條件下，當天重複量測所獲得微粒數量濃度之組內相對標準偏差

Load	Day1		Day2		Day3	
	N	RSD (%)	n	RSD (%)	n	RSD (%)
0%	3	4.2	3	3.7	3	0.6
25%	3	0.9	3	0.8	3	0.8
50%	-	-	3	0.8	3	1.6



92 圖 3-1 研究計畫整體架構

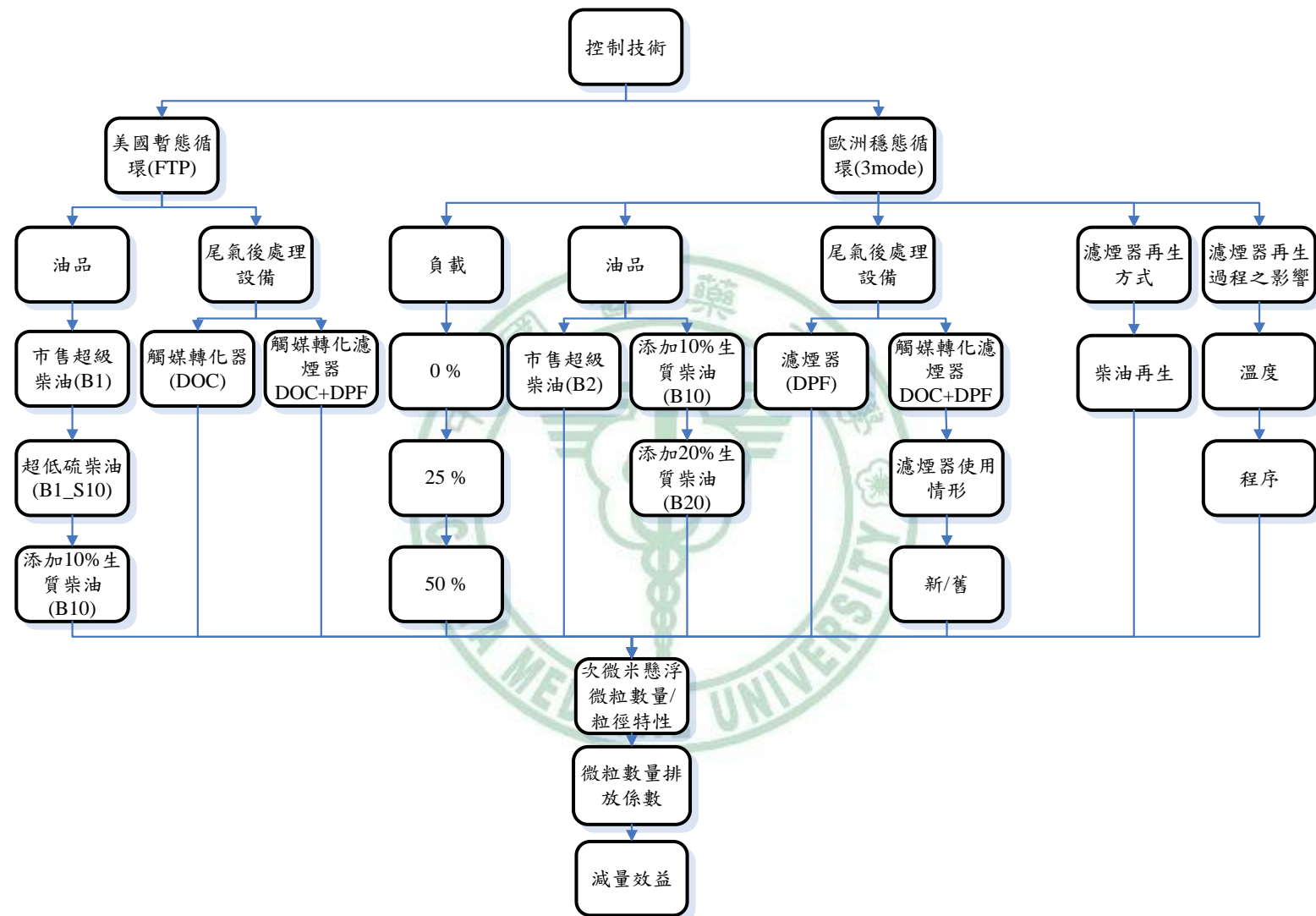
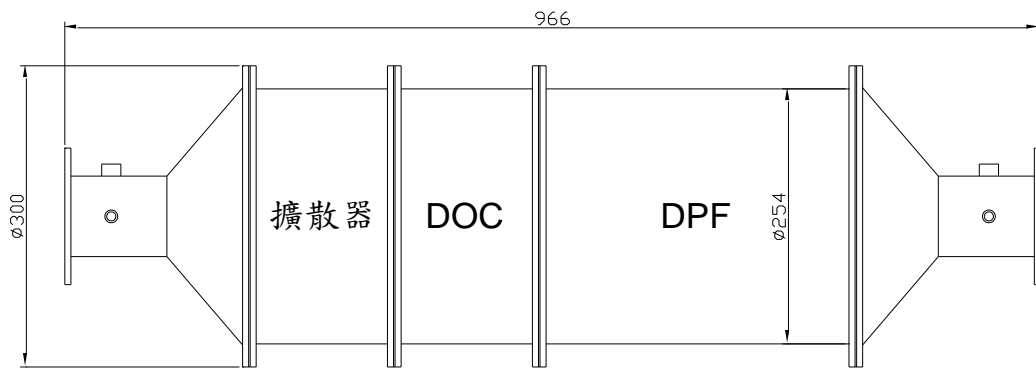


圖 3-2 研究方法



(a)



(b)



(c)



(d)

圖 3-3 濾煙器照片 (a) 濾煙器平面圖 (b) 實際照片 (c) DOC (d) DPF

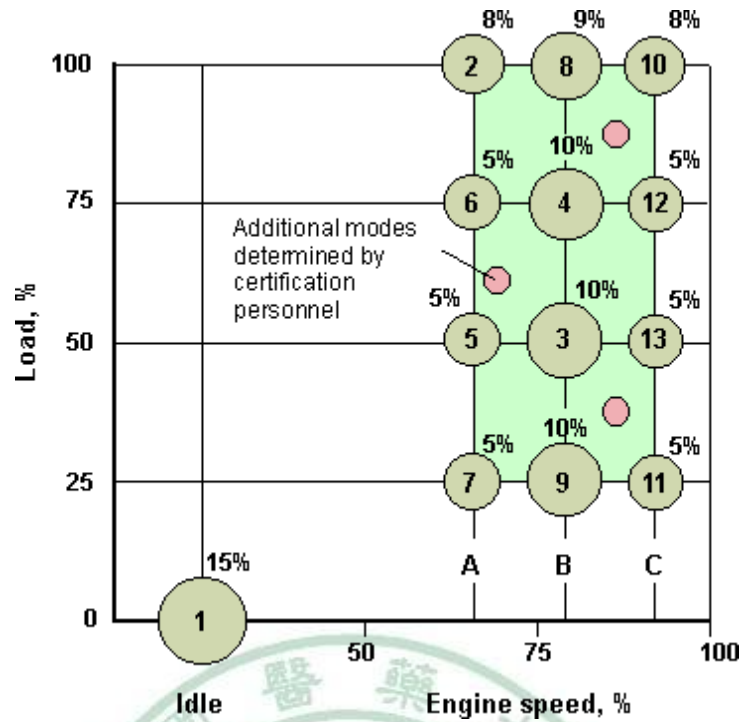


圖 3-4 歐洲穩態循環

US transient cycle

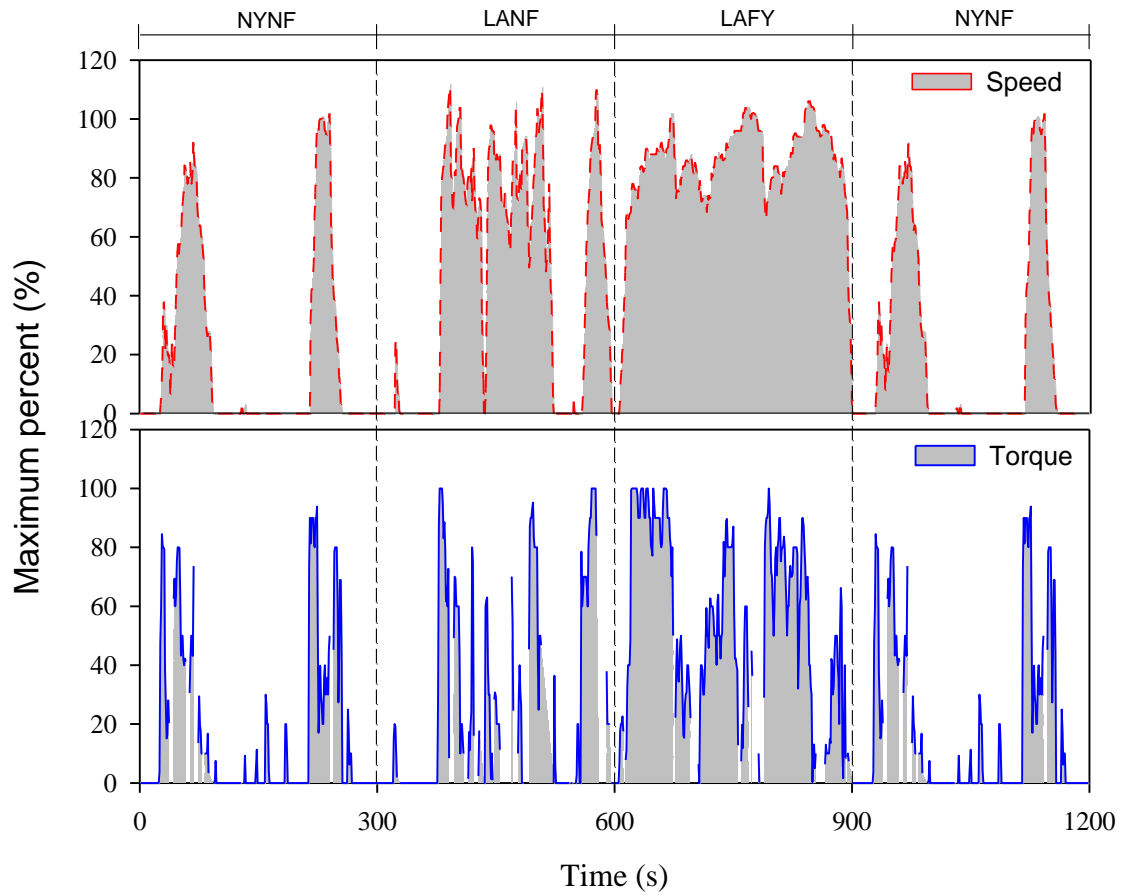


圖 3-5 美國暫態循環測試曲線



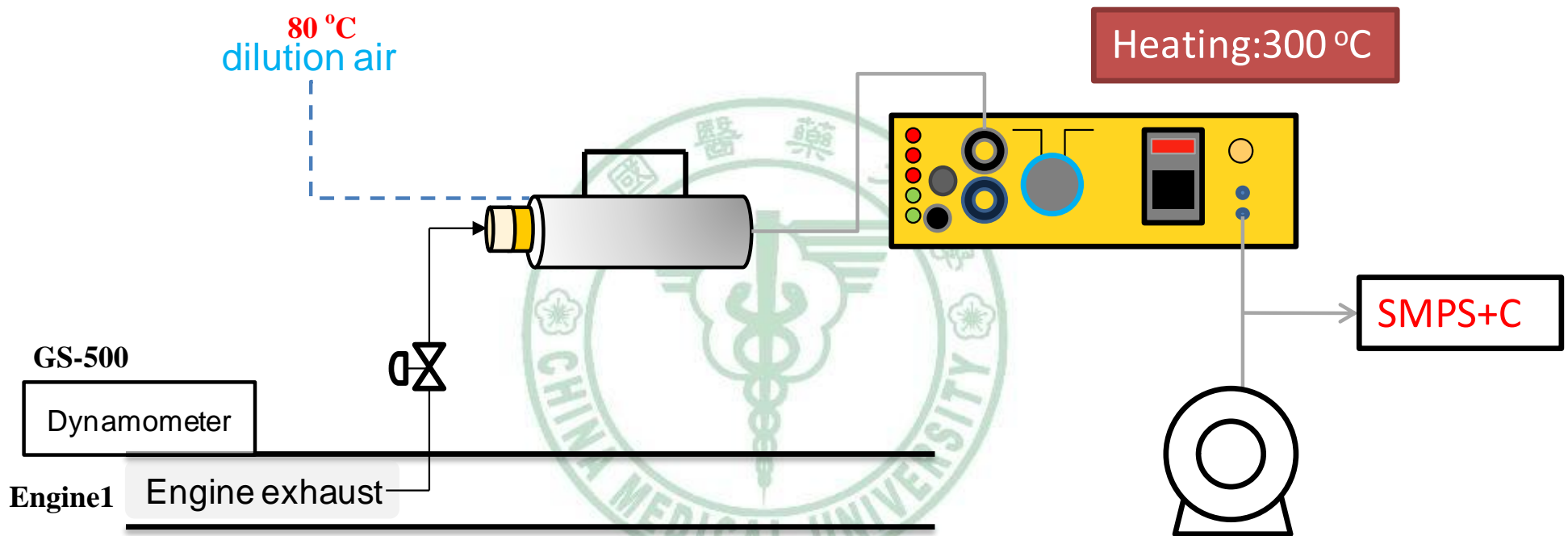


圖 3-6 旋轉盤熱稀釋系統示意圖

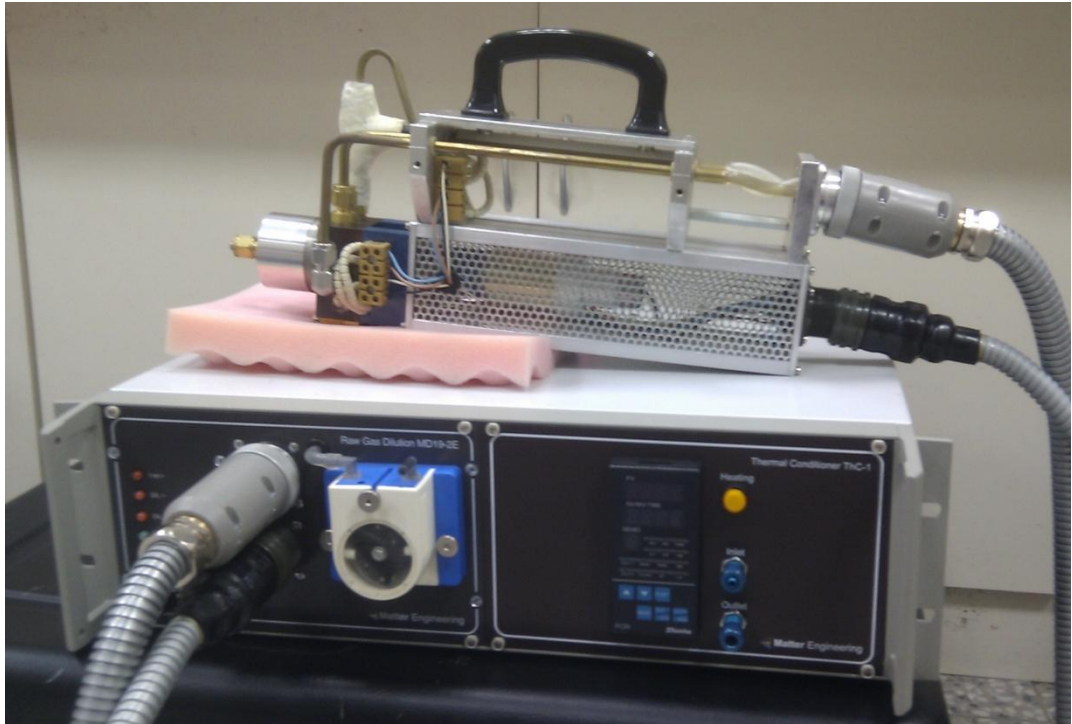


圖 3-7 旋轉盤熱稀釋系統儀器實際圖

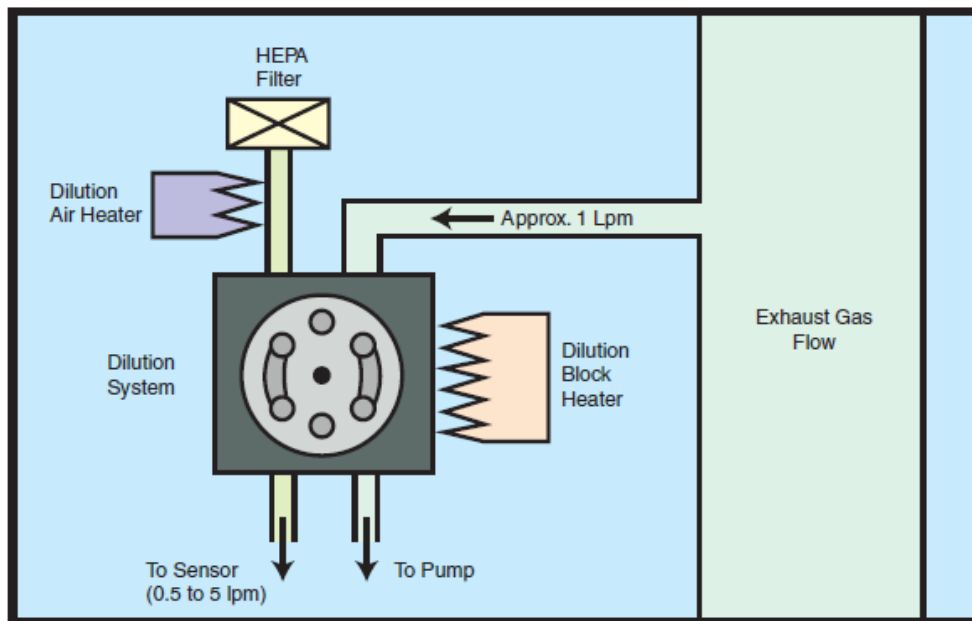


圖 3-8 旋轉盤稀釋氣原理圖



圖 3-9 旋轉盤樣本盤 (10 盤)

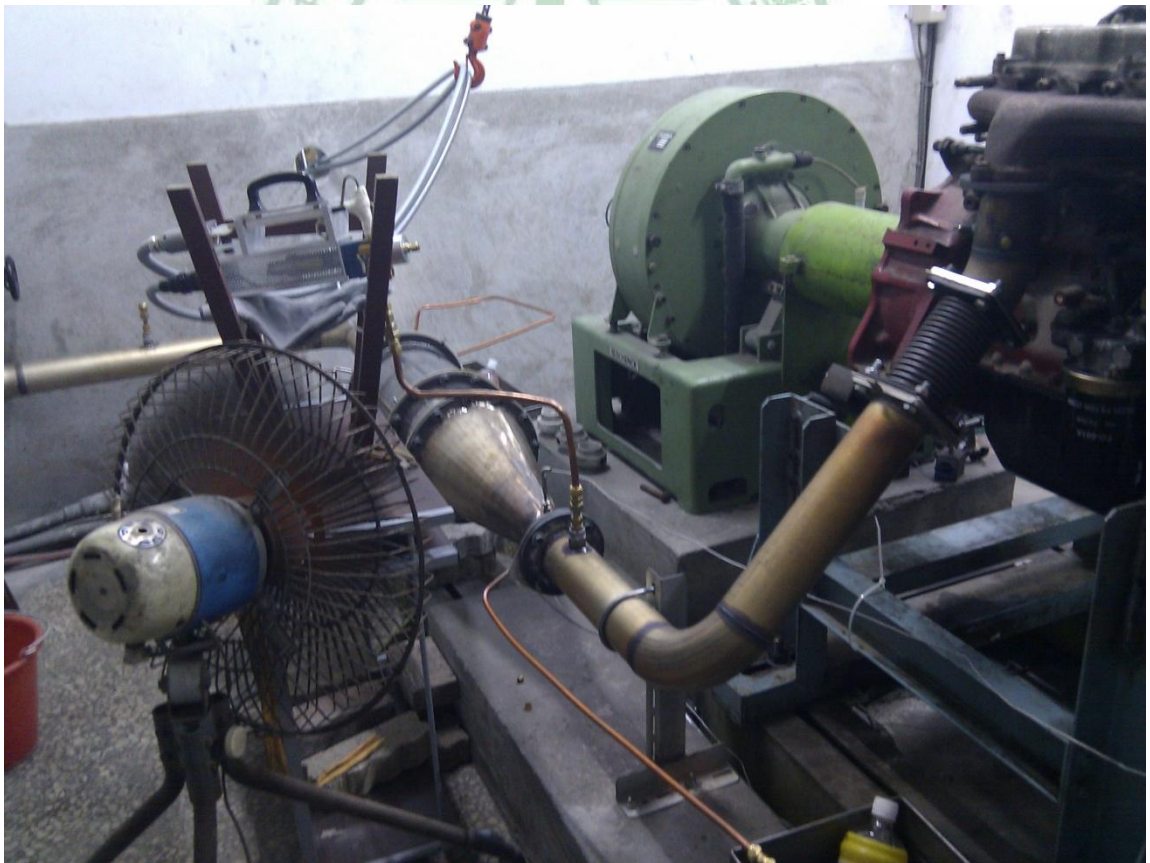


圖 3-10 旋轉盤稀釋系統實際採樣圖

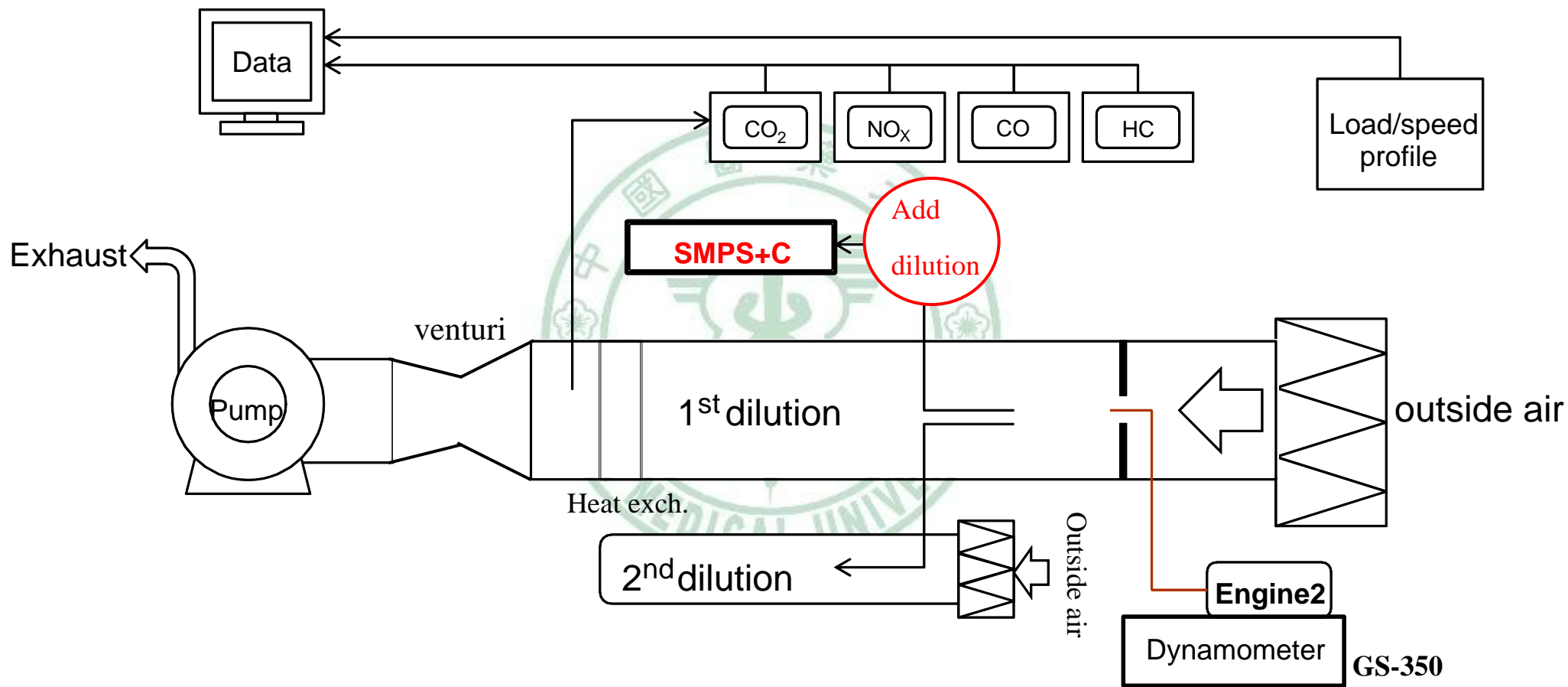


圖 3-11 定容積採樣系統示意圖

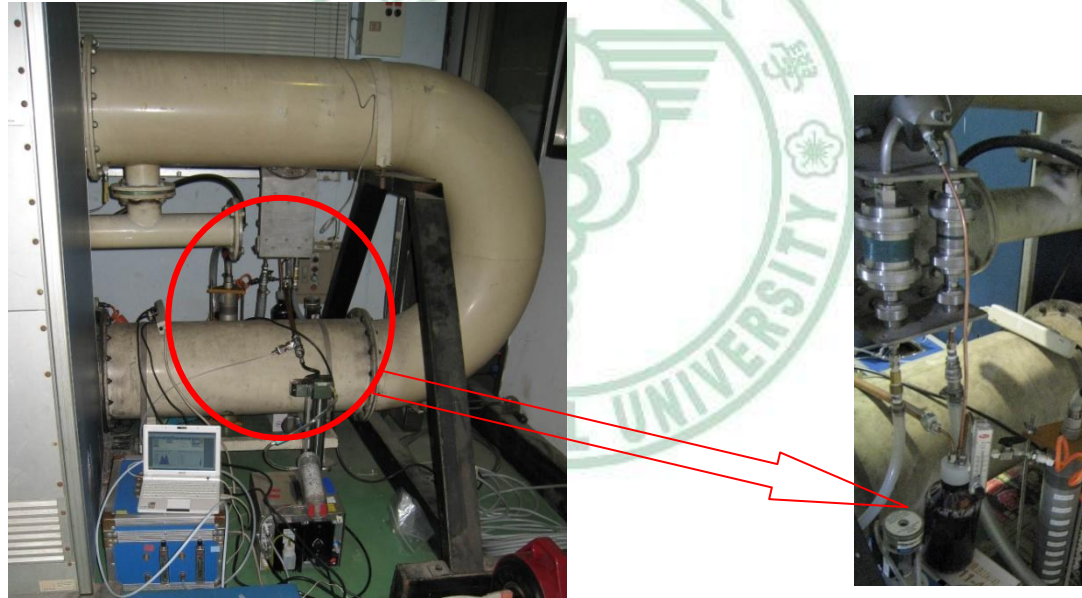
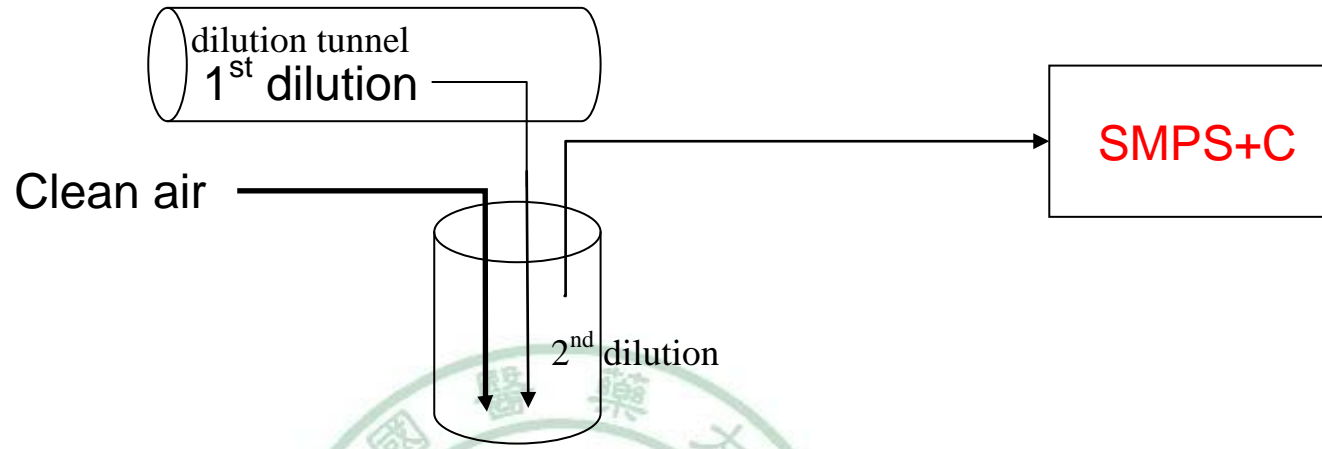
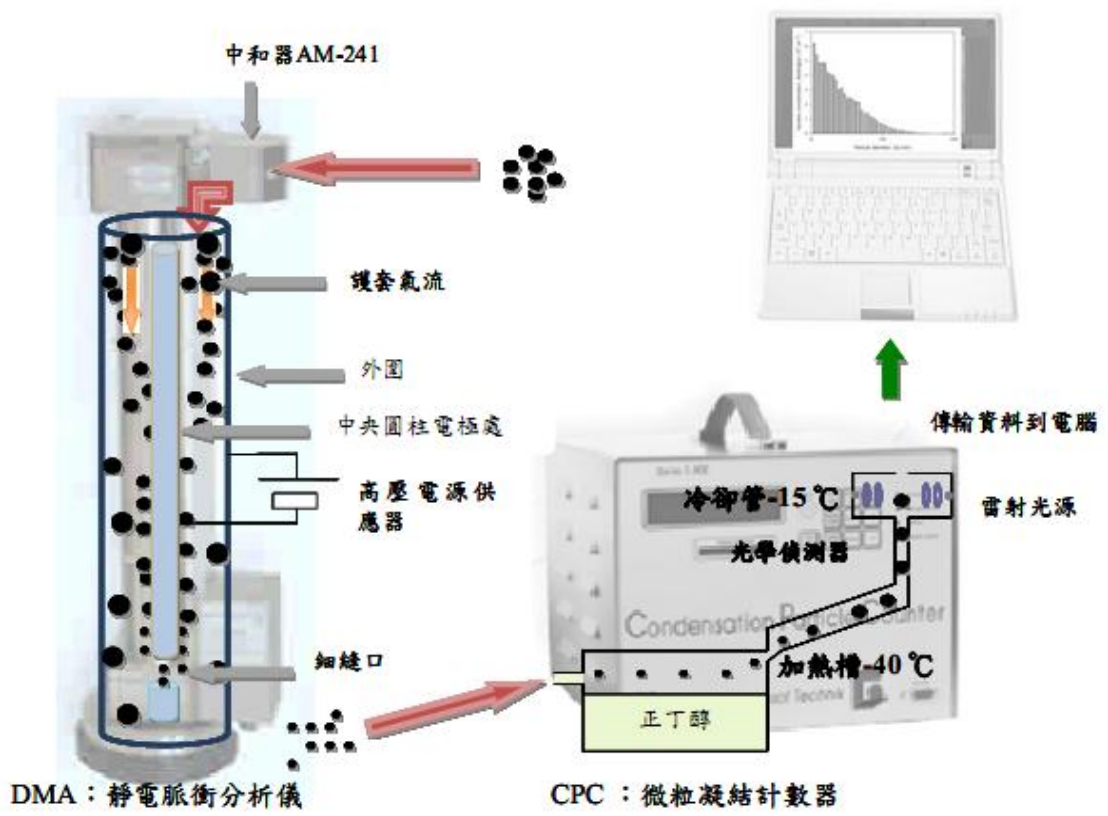


圖 3-12 外加稀釋道 (上圖)示意圖 (下圖)實際採樣圖





(a)



(b)

圖 3-13 SMPS+C 圖 (a)構造示意圖 (b)儀器實際圖

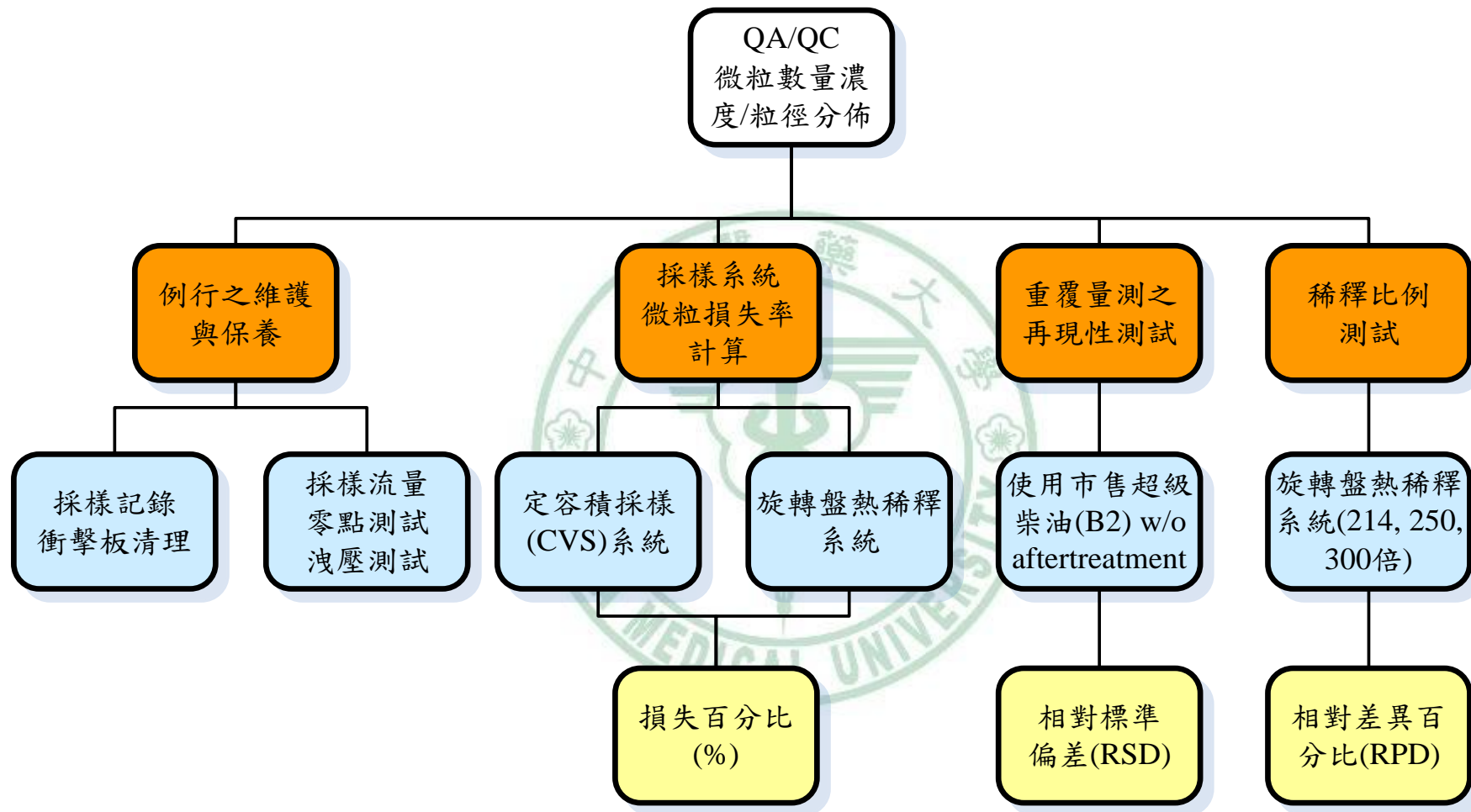


圖 3-14 採樣系統 QA/QC 架構

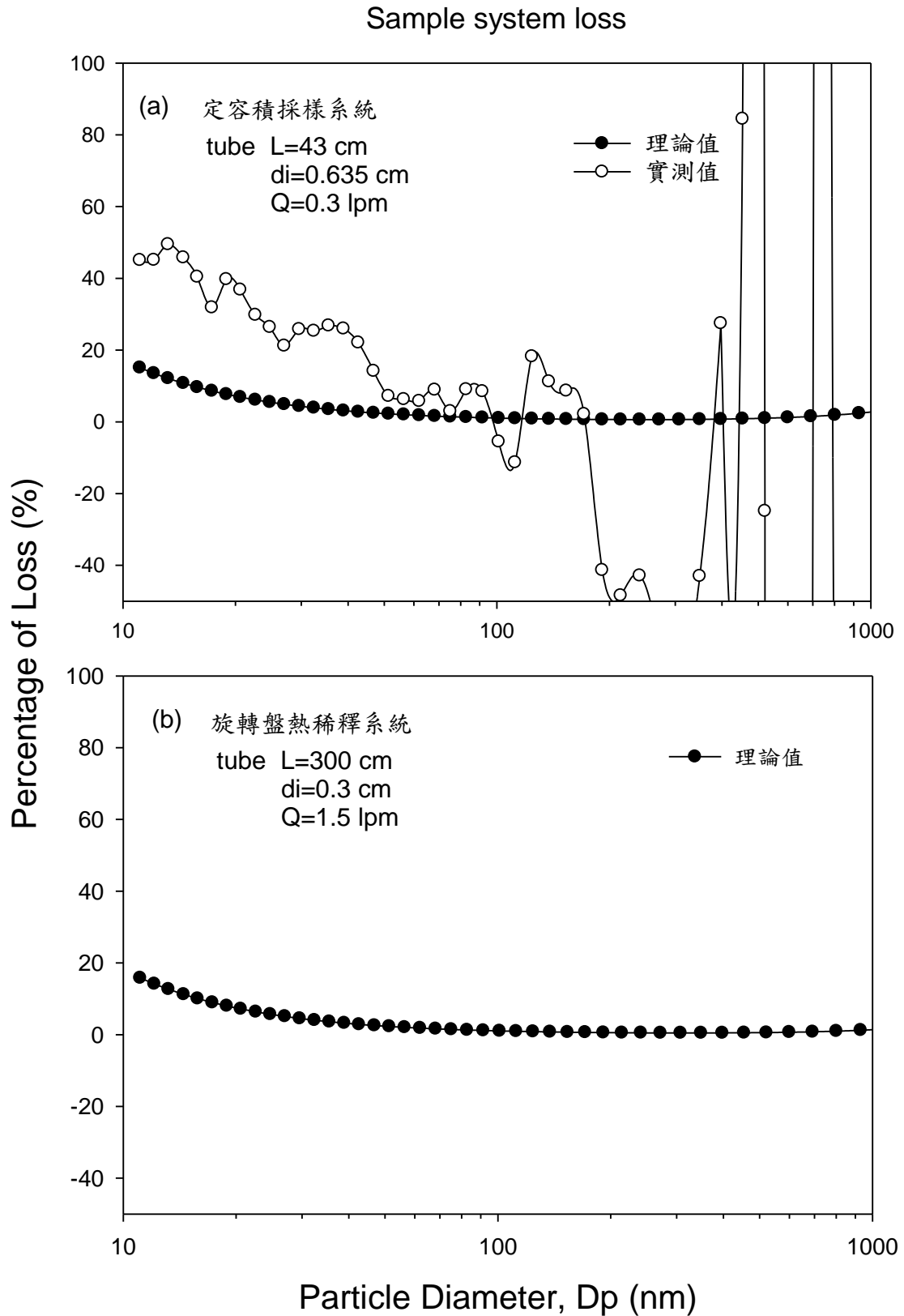


圖 3-15 採樣系統之擴散與重力微粒損失百分比: (a)定容積採樣系統 (b)

旋轉盤熱稀釋系統之損失

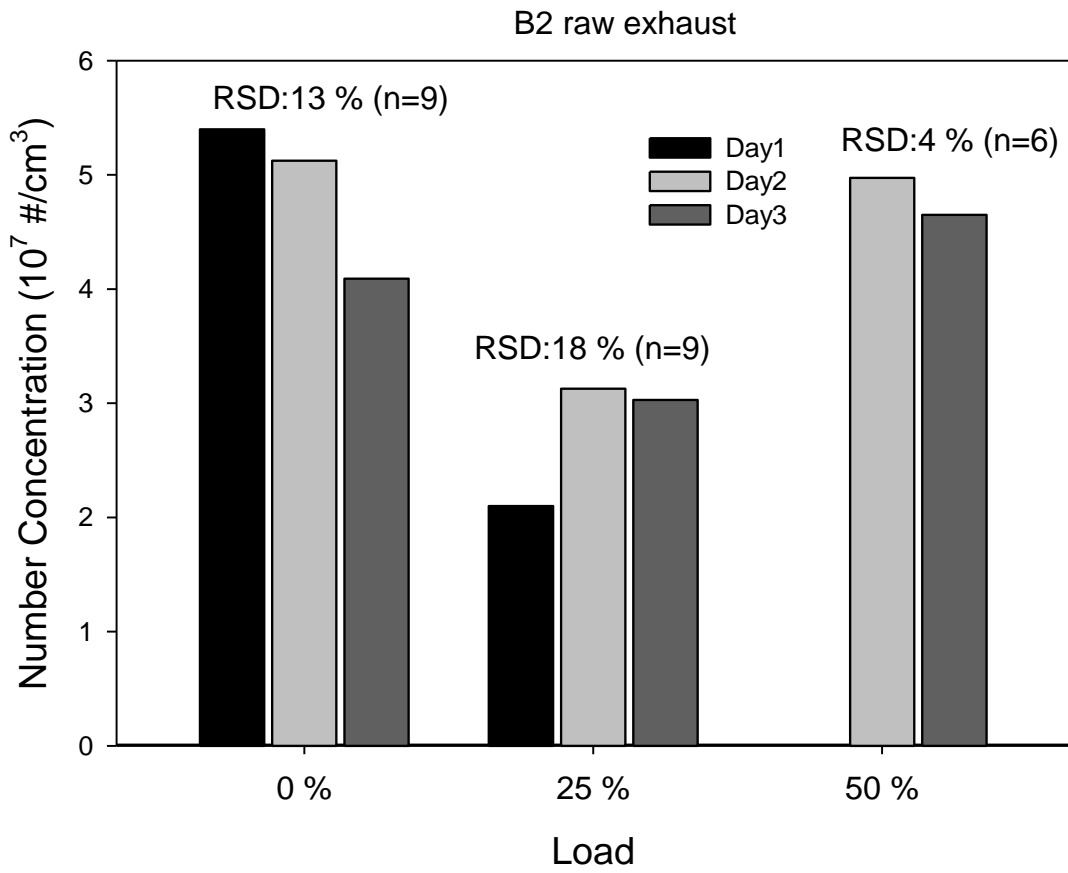


圖 3-16 同一引擎測試條件下，不同天量測所獲得微粒數量濃度之組間

相對標準偏差

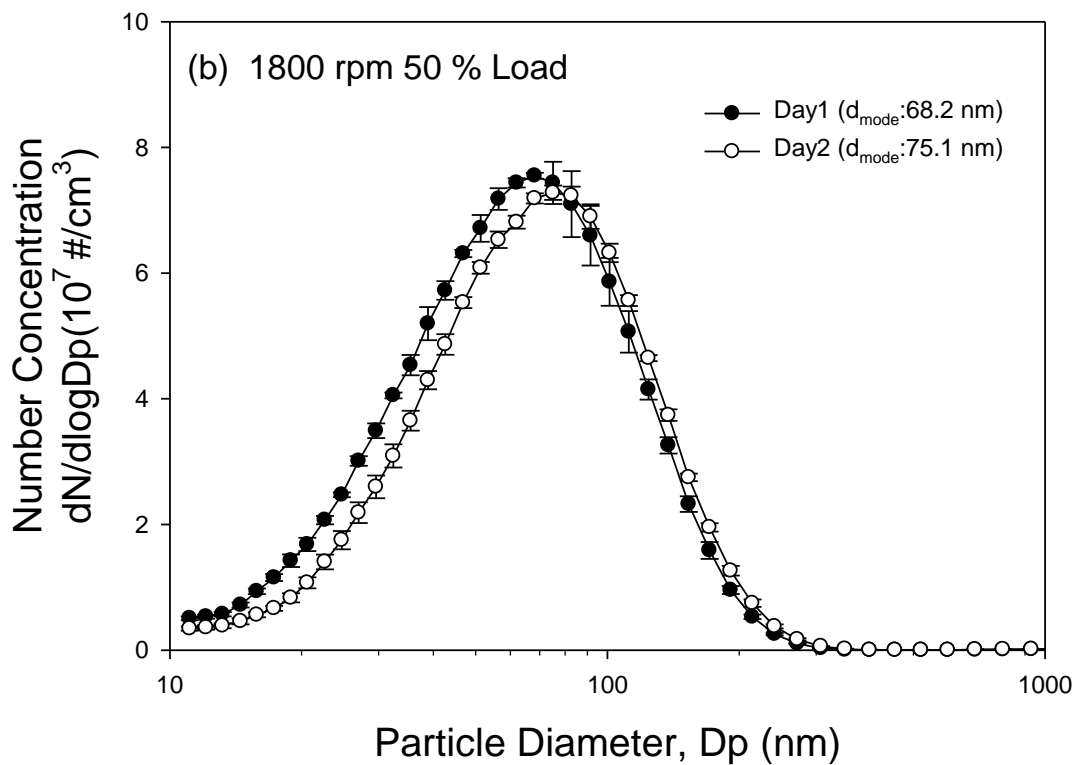
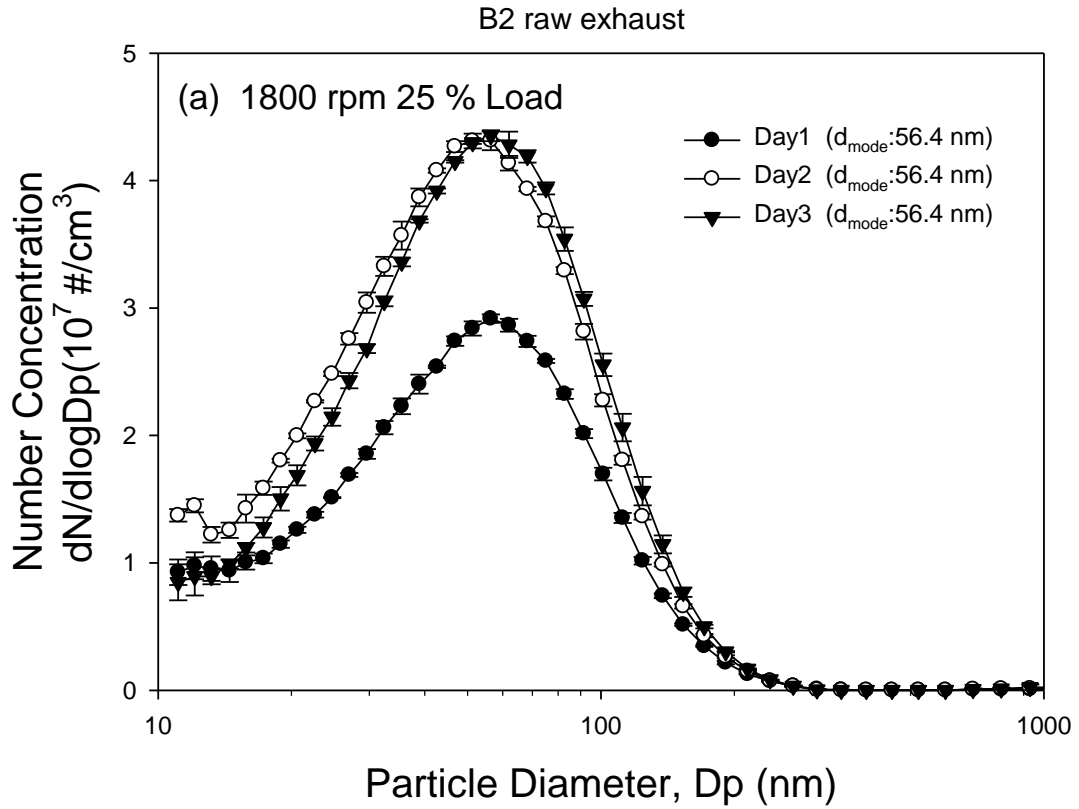
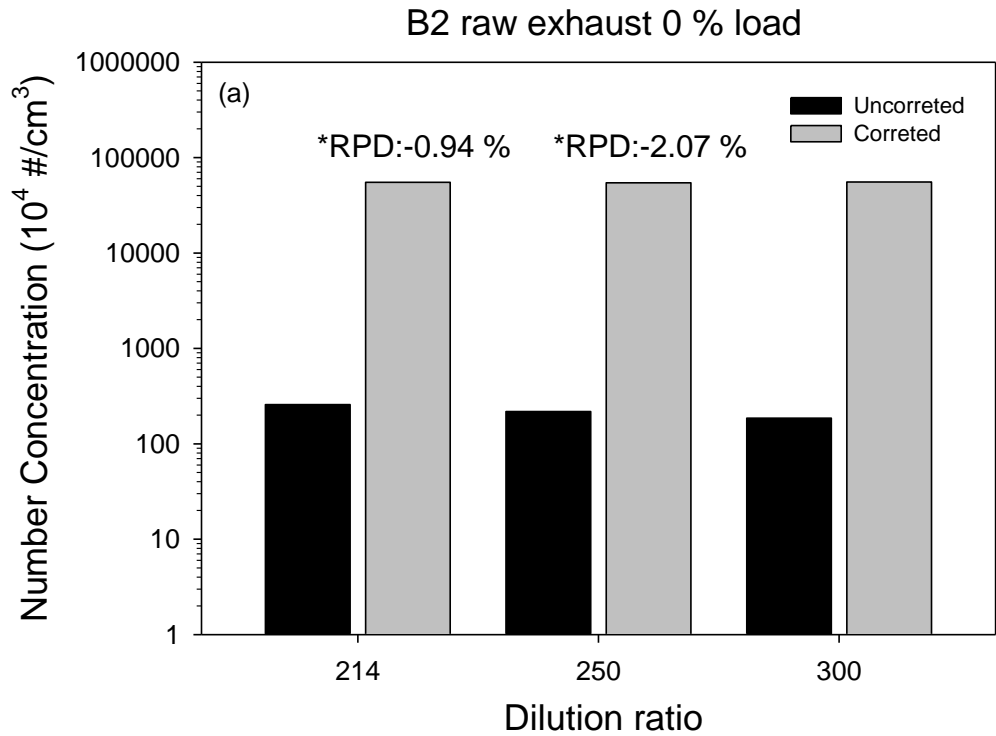


圖 3-17 同一引擎測試條件下不同天採樣之粒徑分布再現性測試(a)負載 25% (b)負 50%下使用一般市售超級柴油未裝設尾氣後處理設備





\*corrected RPD以稀釋300倍為基準之各組相對差異百分比

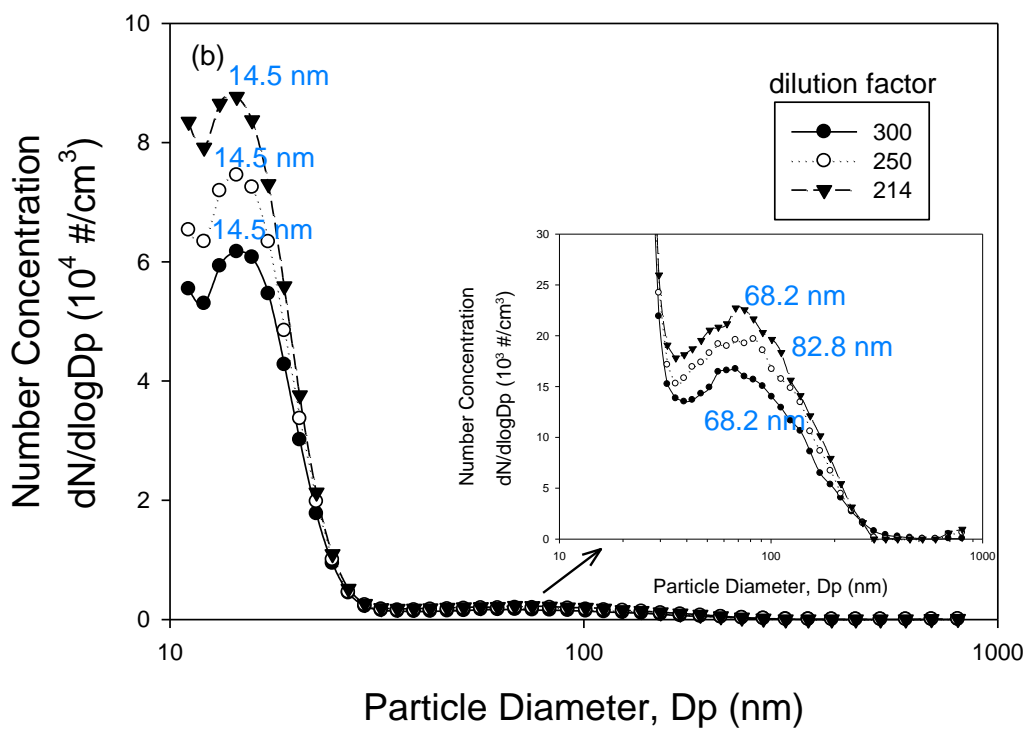


圖 3-18 不同稀釋倍數對微粒數量濃度與粒徑分布之影響(a)數量濃度(b)

粒徑分布(未調整稀釋倍數)

## 第四章 結果與討論

### 4.1 微粒相之半揮發性物質

本研究於使用熱旋轉盤稀釋器時，對稀釋後之廢氣樣本進行高溫加熱至 300 °C，此加熱程序可去除揮發性物質確保採樣之樣本為非揮發性微粒(BP < 300 °C)。故於引擎低負載與高負載(0 和 50%負載)時，比較加熱與不加熱樣本，來看其對微粒數量濃度與粒徑分布之影響。

樣本稀釋後未加熱與加熱之結果，如表 4-1 樣本加熱與否對微粒數量濃度之影響所示，在 0%負載時，未加熱濃度為  $9.42 \times 10^7 \text{ \#/cm}^3$ ，加熱至 300 °C 後微粒數量濃度為  $4.09 \times 10^7 \text{ \#/cm}^3$ ，結果顯示加熱後微粒數量濃度減少約一半。然而在高負載(50%)的狀態下，未加熱濃度為  $6.53 \times 10^7 \text{ \#/cm}^3$ ，加熱至 300 °C 後微粒數量濃度為  $5.72 \times 10^7 \text{ \#/cm}^3$ ，結果顯示加熱後微粒數量濃度減少約 12%。分布結果如圖 4-1 樣本加熱與否對微粒數量濃度粒徑分布之影響，由圖(a)中看出低負載(0%)時，樣本加熱至 300 °C 後，波峰位置從 39 nm 移至 15 nm；而在高負載(50%)時，如圖(b)所示，除了數量上有些微差異外，其分布情形與未加熱前一致，都為粒徑位於 75 nm 之單峰分布。

此結果可知，在引擎低負載操作下，微粒由大量低揮發與半揮發性物質組成，大量膠結或吸附於碳粒表面，使得微粒粒徑增大至 39 nm，這些揮發性物質隨著樣本加熱而揮發，顯示出核心碳粒大小為位於 15

nm 凝核峰微粒。此結果與 Rónkkó et al (2007)和 Kittelson et al. (2006)對低負載樣本加熱後結果一致，其更指出引擎燃燒過程中，產生之凝核峰微粒確實有非揮發性(non-volatile)固態微粒，而非由氣態轉化為固態核化所產生之微粒。而在 50%負載時，不論在數量濃度或粒徑分布上，加熱與否都未造成太大之差異，主要因素為引擎高負載操作下，由於本身燃燒溫度較高，微粒組成即為固態微粒；且相對 0%負載而言，位於累積峰微粒多，因此提供凝核峰微粒膠結、吸附表面，故於高負載時加熱與否對微粒數量濃度粒徑分布無明顯之影響(Kittelson et al., 2006; Ronkko et al., 2007)。再者，陳勳融(2011)研究中，針對惰轉、低、中及高轉速情況下進行 OC/EC 測試，其值分別為 3.60、3.37、0.75 及 0.46，顯示惰轉及低轉速中，尾氣中包括大量有機物質；在中及高轉速時，則為無機碳。再一次證明，引擎轉速時排氣溫度低，因而產生大量揮發性物質，與本研究結果相當(陳勳融, 2011)。

## 4.2 穩態測試：旋轉盤熱稀釋系統

暫態循環旨在模擬實際行車型態，包含多種引擎運轉條件(扭力、轉速)，故通常用於推估車輛行車時之污染物排放總量計算，進而了解現況以研擬改善策略。但由於其行車型態變化大且快，故很難定義行車型態與尾氣中微粒數量濃度與粒徑分布之關係。有鑑於此，故本研究乃針對穩態進行深入研究。研究對象為歐洲穩態循環中加權較重之 3-5 個模式進行採樣，分別為 1、3、9、4 和 8 模式(詳見 3.3.2)，主要以模式 1、3 和 9 為主。依據前述三個穩態模式下，以下將針對負載、油品、與尾氣後處理設備進行微粒數量濃度與粒徑分布之探討。

### 4.2.1 不同負載測試

本研究於各實驗條件下，進行不同引擎負載測試，在此之負載主要為扭力差異，旨在瞭解行車型態對引擎尾氣中微粒數量濃度與粒徑分布造成影響。在未裝設與裝設尾氣後處理設備，依不同採樣條件進行不同負載測試，包含 0、25、50、75 和 100% 負載 5 點，但各條件依實際採樣時情況，主要探討 0、25 和 50% 負載，部分延伸至 75 和 100% 負載，故不一定包含全部 5 點測試。

#### 次微米微粒數量濃度

未裝設尾氣後處理設備在不同條件下負載數量濃度之比較結果如表

4-2，在 B2\_run1 時，0% 負載尾氣微粒數量濃度為  $5.12 \times 10^7 \text{ \#/cm}^3$ ，25 和 50% 負載分別為  $3.13 \times 10^7$  和  $4.97 \times 10^7 \text{ \#/cm}^3$ ；由此看出 0% 負載之排放量高於 25% 負載，但由於 0% 負載為惰轉，故以 25% 負載為基準(baseline)來評估增加負載之影響，當負載增加到 50% 時，其尾氣中微粒數量濃度增量 59%；在另外兩種生質柴油 3 負載採樣中，B10 50% 負載相較於 25% 負載增量 65%，B20 50% 負載相較於 25% 負載增量 73%，此可顯示在使用不同油品之情況下，也有相同之趨勢。而在 B2\_run2，增加 75% 負載之採樣，結果如圖 4-2 使用一般市售超級柴油未裝設尾氣後處理設備在不同引擎負載之微粒數量濃度所示，在 0% 負載的情況下，微粒數量濃度為  $4.09 \times 10^7 \text{ \#/cm}^3$ ；其後由 25~75% 負載微粒數量濃度為  $3.03 \times 10^7$ 、 $4.65 \times 10^7$  和  $4.97 \times 10^7 \text{ \#/cm}^3$ ；由此可知，在 0% 負載，引擎尾氣微粒數量濃度高於 25%，與前述結果相同，而以 25% 為基準，50% 與 75% 負載增量 54 和 64%。值得注意為，在引擎在 0% 負載時，尾氣中還是具有相當的微粒數量排放量，此排放量高於 25% 負載操作，相當於 50% 負載時。

裝設尾氣後處理設備後，不同條件下負載數量濃度之比較如表 4-3，由表中看出在 B2 裝設 DOC+DPF 引擎 0、25 和 50% 負載之微粒數量濃度分別為  $6.06 \times 10^4$ ， $2.18 \times 10^4$  和  $3.33 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$ ，顯示 0% 負載高於 25% 負載，而以 25% 為基準，50% 負載增量 53%，其結果與未裝設尾氣後處理設備一致，且在 B10 與 B20 有相同趨勢；顯示加裝 DOC+DPF 並未改



變負載對數量濃度之影響，當負載越高，排放的微粒越多。而在 B2 裝設 DPF，有 0~100% 負載測試，結果如圖 4-3 使用一般市售超級柴油加裝濾煙器在不同引擎負載之微粒數量濃度所示，引擎 0、25、50、75 和 100% 負載所排放尾氣中微粒數量濃度依序為  $1.03 \times 10^4$ 、 $6.09 \times 10^3$ 、 $1.82 \times 10^4$ 、 $5.66 \times 10^4$  和  $2.23 \times 10^5$  #/cm<sup>3</sup>，以 25% 為基準依序增量 199、829 和 3553%，顯示此結果與未裝設尾氣後處理設備一致，排除 0% 負載，隨著負載增高尾氣中微粒數量也有增高的趨勢。值得注意的是，在 100% 負載時，其微粒數目增加之比例較其他高很多，由此推論引擎在全負載時，其排放之微粒數量遠高於其他負載情況；而在 0% 負載之微粒數量結果也與未裝氧化觸媒濾煙器之結果一致，高於 25% 負載。

所有條件中，值得注意的為裝設新氧化觸媒濾煙器，結果如圖 4-4 使用一般市售超級柴油加裝新氧化觸媒濾煙器在不同引擎負載之微粒數量濃度，引擎 0、25、50、75 和 100% 負載所排放尾氣中微粒數量濃度依序為  $6.85 \times 10^5$ ， $1.25 \times 10^5$ ， $5.69 \times 10^4$ ， $1.14 \times 10^5$  和  $4.26 \times 10^5$  #/cm<sup>3</sup>，0% 負載微粒數量濃度高於 25% 負載，以 25% 負載為基準依序減量 55%、減量 9% 和增量 240%，顯示在裝設新氧化觸媒濾煙器時，負載對微粒數量濃度之影響無一致之趨勢，其可能原因為新濾煙器在一開始使用時效率較差，故相對在 25% 負載為基準時有較高之排放，因而產生不同於前之此結果。

綜合上述，除了 DOC+DPF<sub>n</sub>，可發現引擎尾氣原氣中不論油品之改變或裝設尾氣後處理設備，微粒數量濃度隨著負載增加而有增加的趨勢；此結果與 Zhu et al. (2010)研究結果相同，尾氣中微粒數量濃度隨負載增加而增加，且 25%與 50%負載數量濃度為  $4.59 \times 10^7$  和  $6.61 \times 10^7$  #/cm<sup>3</sup> 與本研究數量濃度相近，且在使用不同油品負載對微粒結果也相同(Zhu et al., 2010)；Heillilä et al. (2009)在 60-100 nm(soot particle)數量濃度結果相同；Rönkkö et al. (2007)針對 4 種負載數量濃度結果也有相同之趨勢；Di et al.(2009)使用生質柴油也具有相同趨勢(Heikkila et al., 2009; Ronkko et al., 2007)。造成此之因素為負載越高，使用油耗增加因此排放也增加；且高負載時溫度和壓力相對也高，因此有助於微粒生成；Tsolakis (2006)也指出在引擎高負載時，尾氣流量增大使得尾氣中碳粒燃燒氧化時間縮短，因此導致微粒數量增加(Di et al., 2009; Ning et al., 2004; Tsolakis, 2006; Schröder et al., 1999)。

#### 次微米微粒數量濃度粒徑分布

圖 4-5 分為未裝設尾氣後處理設備不同負載之微粒數量濃度粒徑分布，由圖(a)中看出，使用一般市售超級柴油除了 0%負載，其餘負載情況下微粒數量濃度粒徑分布都呈現單峰分布，0%負載之主要波峰位於 15 nm，次要波峰位於 68 nm，而 25、50 和 75%負載波峰位置分別為 56、

75 和 92 nm。添加 10% 生質柴油數量濃度粒徑分布結果如圖 4-5(b)，0、25 和 50% 主要波峰位於 15、51 和 68 nm，波峰分布情形與 B2\_S50 結果相似；而添加 20% 生質柴油數量濃度粒徑分布結果如圖 4-5(c)，0、25 和 50% 主要波峰位於 16、56 和 75 nm，其負載與分布趨勢也與之前兩種條件相似。由此可看出，隨著引擎負載增加，尾氣中微粒除了數量上增加之外，微粒粒徑也隨之變大。微粒粒徑增大原因可能為較多的微粒數量排放增加微粒膠結機率，使得更多微粒膠結因而導致微粒粒徑之增大。在 0% 負載操作下，微粒數量濃度粒徑分布成雙峰分布，主要波峰位於 < 20 nm，且高出其他負載很多；由此可知，引擎在 0% 負載操作條件下，會產生大量凝核峰微粒。其成因可能為其雖然有波峰位於累積峰(30 - 500 nm)，但相對其他負載條件，0% 負載在累積峰之微粒數量濃度相對少，故其提供微粒膠結之表面大量減少，使微粒粒徑維持於凝核峰的狀態(Kittelson et al., 2006)。

裝設尾氣後處理設備在不同引擎負載之微粒數量濃度粒徑分布結果如圖 4-6 所示，由於裝設尾氣後處理設備後微粒數量濃度低，故其粒徑分布呈現高度變異性；由(a)圖中看出，裝設氧化觸媒濾煙器主要呈單峰分布，0、25 和 50% 負載時，波峰位置為 11、56 和 68 nm，雖然濃度低，但還是可以看出微粒粒徑分布趨勢與未裝尾氣後處理設備前相同，隨著負載變大，波峰位置隨之增大。裝設濾煙器之結果，如圖 4-6 (b)，0、25、

50、75 和 100% 負載，波峰位置為 11、56、56、75 和 83 nm，雖然在 25% 和 50% 負載的波峰位置相同，但其可能為微粒數量濃度太少之影響，故負載對微粒粒徑分布也是隨著負載增加波峰位置也隨之變大，範圍為 56 到 83 nm。圖(c)為裝設新氧化觸媒濾煙器不同負載之粒徑分布，0、25、50、75 和 100% 負載，波峰位置為 11、43、68、19 和 17 nm，針對此結果在 50% 負載前，都與前述研究結果一致；但在 75 與 100% 負載之波峰位置卻愈來愈小，其與加裝氧化觸媒濾煙器與單使用率煙器結果不相同，其可能為新濾煙器產生之變化，在其探討率煙器之章節再行討論。在此，還是可以看到 0% 負載波峰位置則位於本儀器量測下限 11 nm，顯示引擎在 0% 負載操作時會產生大量凝核峰之微粒。

綜合上述不同負載對引擎尾氣中微粒數量濃度粒徑分布之影響，發現尾氣中微粒數量濃度隨著負載的增加而增高，而 0% 負載之微粒排放量相當於 50% 負載；而粒徑分布方面，0% 負載之操作會產生大量之凝核峰微粒，其餘負載微粒粒徑波峰位於累積峰，呈單峰分布，且隨著負載之增加波峰位置隨之增大。Rönkkö et al. (2007) 對於低負載與高負載之微粒粒徑分布也與本研究具有相同趨勢(圖 2-4)，在低負載時有大量凝核峰之微粒產生，而與 Kittelson et al.(2006)、Park et al.(2003)和 Jund and Kittelson (2005)有相同趨勢，顯示在引擎低負載時產生大量凝核峰微粒；Vaaraslahti et al. (2004)和 Rönkkö et al. (2007)也指出此凝核峰微粒與油品



中含硫量無關，且本研究為樣本加熱後之結果，因此可證明凝核峰確實存在非揮發性之固態微粒(Jung and Kittelson, 2005; Kittelson et al., 2006; Park et al., 2003; Ronkko et al., 2007; Vaaraslahti et al., 2004)。且 Wong et al. (2003)、Di et al. (2009)和 Zhu et al. (2010)也發現增加引擎負載，其所排放之微粒粒徑也變大：但與 Heikkilä et al. (2009)針對 60-100 nm 波峰位置有些微差異，主要在引擎 50%負載時微粒粒徑較大，其餘負載之粒徑趨勢也相同(Di et al., 2009; Heikkila et al., 2009; Wong et al., 2003; Zhu et al., 2010)。此外，使用不同油品在固定負載所產生之微粒固定，由此可推測不同粒徑微粒之主要貢獻來源。針對此有幾項成因，引擎低負載時，由於其溫度低且滯留時間較長，在此條件下適合凝核峰微粒產生；且由於低負載累積峰微粒排放較少，大量減少了微粒可吸附、膠結之表面，因此存在大量凝核峰微粒(Kittelson et al., 2006)。在引擎高負載時，微粒數量排放也增加，因此增加微粒膠結機率，進而導致微粒粒徑增加(Di et al., 2009; Lapuerta et al., 2007; Tsolakis, 2006)：且在高負載時，排氣溫度高因此使得在冷卻時會產生較大之微粒(Ning et al., 2004)。

#### 4.2.2 不同油品測試

針對不同油品，本研究進行了生質柴油測試，經由添加國內鴻潔公司以廢食用油生產之柴油，分別添加 10%和 20%在一般市售柴油中，進



行不同油品之比較。

### 次微米微粒數量濃度

不同油品測試結果，圖 4-7 為在相同負載下，不同油品之微粒排放數量濃度。相同在 0% 負載之條件下，B2\_S50、B10 和 B20 之數量濃度依序為  $1.20 \times 10^8$ 、 $1.29 \times 10^8$  和  $8.03 \times 10^7$  #/cm<sup>3</sup>；在 25% 負載條件下，B2\_S50、B10 和 B20 之數量濃度依序為  $7.31 \times 10^7$ 、 $5.53 \times 10^7$  和  $4.40 \times 10^7$  #/cm<sup>3</sup>；在 50% 負載條件下，B2\_S50、B10 和 B20 之數量濃度依序為  $1.16 \times 10^8$ 、 $9.14 \times 10^7$  和  $7.62 \times 10^7$  #/cm<sup>3</sup>。以 B2\_S50 為基準，看出除了使用 B10 在 0% 負載，有些微微粒數量增量的情形外，其餘條件下，使用生質柴油對引擎尾氣中排放之微粒數量濃度都有減量的效果；且將添加 10% 和 20% 生質柴油做比較，可發現使用 B20 生質柴油之微粒數量排放量都小於 B10。實際減量程度，結果如圖 4-8 在相同負載下使用不同油品之微粒數量濃度減量效率，由圖中可看出以 B2\_S50 為基準(base)，扣除增量的之外，B10 相同條件下的減量程度為 24.4% 和 21.3%，而 B20 的減量程度為 32.9%、39.8% 和 34.4%。故由此可發現，使用 B10 生質柴油對於尾氣中微粒減量效率約為 20%；而使用 B20 生質柴油減量效率則約為 30~40%。

不同油品之採樣，經由加權平均後，結果如圖 4-9，B2\_S50、B10 和 B20 微粒加權平均數量濃度為  $4.51 \times 10^7$ 、 $4.15 \times 10^7$  和  $2.95 \times 10^7$  #/cm<sup>3</sup>。

一般市售超級柴油，在加權平均中引擎排放微粒數量濃度最高，而隨著使用油品的改變，柴油引擎所排放的微粒數量也隨之減少，且在使用 B20 生質柴油時達到最少。以一般市售超級柴油為基準，B10 與 B20 之減量效率分別為 8% 與 35%；由此結果可知，於一般市售超級柴油中添加生質柴油，確實會對引擎排放微粒數量上有減量的效果，且由研究結果中可發現，生質柴油添加幅度越高，引擎尾氣中微粒數量有越少的趨勢，且與前述分別在相同負載下，不同油品之微粒數量有相同之結果。然而，在許多研究中，使用生質柴油對於數量濃度排放都持負面看法，Di et al. (2009)、Kim and Choi (2010)、Frank et al. (2007) 和 Zhu et al. (2010) 研究結果都指出，使用生質柴油會造成引擎尾氣中微粒數量濃度增量，其主要原因有生質柴油熱值相較於一般柴油低，所需燃料相對來說較多 (Di et al., 2009; Frank et al., 2007; Kim and Choi, 2010; Zhu et al., 2010)；再者酯類結構本身對於碳黑抑制效果不好 (Mueller et al., 2003; Westbrook et al., 2006)；生質柴油之高黏度導致空氣燃料混合效果佳，因此產生較多凝核峰微粒 (Pagan, 1999; Tsolakis, 2006)；生質柴油由於沸點較高，燃燒不完全因而產生凝核峰微粒，因而導致污染物排放增加。而同樣的，也有研究顯示，使用生質柴油對引擎尾氣中微粒數量有正面影響使用，在 Lapuerta et al. (2008)、Fontaras et al. (2010) 和 Heikkilä et al. (2009) 研究中顯示，使用生質柴油尾氣中微粒數量濃度有降低之趨勢，且後兩篇研究

主要針對非揮發性微粒進行探討，與本研究相符(Heikkila et al., 2009; Lapuerta et al., 2008b; Fontaras et al., 2010)。生質柴油其尾氣中排放微粒數量濃度較少之原因為：生質柴油本身油品中含氧量較一般市售柴油高，含氧量高則代表在燃燒時燃燒較完全，故本身在微粒產生上就有較少的排放，而有減量的效果(Jung et al., 2006; Lapuerta et al., 2008b)；且本研究探討非揮發性固態微粒，雖然在 Di et al. (2009)研究中顯示隨著添加生質柴油比例增加，尾氣中 SOF 也跟著增加，但本研究於加熱後去除半揮發性物質之影響，故在數量上也不受其增量而增加；且在許多研究中發現，生質柴油數量濃度增加位於  $< 10 \text{ nm}$  以下之微粒，其超過本研究採樣儀器之量測範圍，因此與本研究趨勢不同。結果與目前法規推行方向相同，使用替代能源來取代目前日漸減少之石化燃料，不但可紓緩使用能源上的困境，還可減少污染物之排放且對環境親和力較高，故生質柴油在推廣上有其必要性且相較於一般柴油對環境影響上也具有較正面的效果(Di et al., 2009)。

#### 次微米微粒數量濃度粒徑分布

在相同負載下使用不同油品之微粒數量濃度粒徑分布如圖 4-10，(a)、(b)和(c)分別為 0%、25%和 50%負載之不同油品數量濃度粒徑分布。由圖(a)中顯示，在引擎 0%負載時，3 種油品都呈現雙峰或多峰分布，在本

研究儀器偵測下限(11.1 nm)處，顯示都有上升的趨勢，但由於處於偵測下限其趨勢不明確，故在波峰討論上將其忽略。在 B2\_S50 時，可看出微粒數量濃度主要波峰位置位於 13 nm，次要波峰位於 68 nm，而眾數則位於 11 nm；在 B10 時，主要波峰位於 15 nm，次要波峰位於 68 nm；在 B20 時，主要波峰位於 16 nm，次要波峰位於 92 nm。此 3 種油品，可看出微粒主要由凝核峰與艾特坎峰所組成，而在凝核峰之不同油品比較上，由圖中可看出微粒波峰有些微變大的趨勢，由 11 nm 到 15 nm，但其變化幅度非常小，故在凝核峰微粒波峰在不同油品之比較上，可視為沒有改變；除非以非常嚴格的標準下，才可說一般市售柴油添加生質柴油，隨著添加生質柴油的比例在凝核峰微粒在粒徑上，有些微增加的趨勢。而在艾坎特峰位置上，在 B2\_S50 和 B10 波峰位置一致，在 B20 則增加到 92 nm，與前兩種油品粒徑有增大的現象，但由於 B10 與 B2\_S50 沒有差異，可能為其生質柴油添加幅度不夠足以影響其粒徑，故在 B20 時艾特坎峰才有粒徑變大的趨勢。

圖 4-10(b)為 25% 負載下之結果，可看出主要為雙峰分布。在 B2\_S50 時，微粒數量濃度粒徑分布主要波峰位於 56 nm，次要波峰位於 12 nm；在 B10 時，主要波峰位於 51 nm，次要波峰位於 12 nm；在 B20 時，主要波峰位於 56 nm，次要波峰位於 12 nm。由此，看出主要波峰位於艾特坎峰，次要波峰位於凝核峰；而在主要波峰上，可看出微粒波峰位置



在 B10 時粒徑最小，而 B2\_S50 與 B20 則相同；在次要波峰上，可看到 3 種油品其波峰位置都相同。因此，在 25% 負載下，不同油品微粒粒徑分布大致呈相同的分布趨勢，除了在艾坎特峰微粒有些許的變化，但其差異非常小，故可當作其無差異。圖 4-10(c) 為 50% 負載之結果，3 種油品主要都呈單峰分布，B2\_S50 主要波峰位置位於 68 nm；B10 位於 68 nm；B20 位於 75 nm。由此看出 B2\_S50 與 B10 在相同位置，而 B20 微粒粒徑有變大的趨勢，其是否與前述之 B10 生質柴油添加比例較低，因而在粒徑上較無影響，直到 B20 才有些微變大的趨勢，但由於其變化幅度非常小，故也可說為沒有變化。

油品加權平均數量濃度粒徑分布結果如圖 4-11 所示，微粒數量濃度粒徑分布主要成雙峰分布，B2\_S50 主要波峰位於 13 nm，次要波峰位於 62 nm；B10 主要波峰位於 15 nm，次要波峰位於 68 nm；B20 主要波峰位於 16 nm，次要波峰位於 68 nm。由此 3 種油品之數量濃度粒徑分布，可看出其分布趨勢都相同，且在波峰位置上差異也不大，主要都位於凝核峰與艾特坎峰，由 B2\_S50 到 B20 主要之粒徑變化有些微的增大，但其變化幅度不大，故針對改變油品，其影響範圍主要為數量上的不同，添加生質柴油其添加幅度越大，數量濃度越低；但在數量濃度粒徑分布上，則無顯著之影響。Fontaras et al. (2010) 和 Tzamkiozis et al. (2011) 研究中使用添加 10% 廢食用油，其粒徑分布與一般柴油無太大之差異



(Fontaras et al., 2010; Tzamkiozis et al., 2011)。然而，也有學者研究顯示引擎尾氣中微粒隨著添加比例越多，微粒粒徑越小(Di et al., 2009; Heikkila et al., 2009; Lapuerta et al., 2008b; Tsolakis, 2006; Zhu et al., 2010)，且粒徑約變小 5 nm 左右。以圖 2-17 為代表，所有添加生質柴油在低中負載時，微粒數量濃度粒徑分布成單峰分布，且粒徑大多小於 100 nm，此與本研究結果相當；但由圖中可發現，隨著生質柴油添加比例增加，微粒波峰位置也相對變小，主要由於生質柴油中含氧量增加，因此微粒粒徑逐漸變小。但對於本研究生質柴油最高添加 20%，而 Di et al. (2009)、Zhu et al. (2010)和 Lapuerta et al. (2008)之研究，生質柴油添加比例較高或為純生質柴油，因此其可能在趨勢上較為明顯。再者，由於本研究將樣本進行加熱後進行探討，若依添加生質柴油比例越高 SOF 排放也越多，因而產生較多凝核峰微粒，導致微粒粒徑變小，若進行樣本加熱後，去除微粒中大量由氣態物質組成凝核峰微粒，則微粒粒徑也會隨之變大，因此添加不同比例之生質柴油微粒粒徑差異也將縮小，將與本研究結果有相同之趨勢(Di et al., 2009; Lapuerta et al., 2008b; Zhu et al., 2010)。

#### 4.2.3 不同尾氣後處理設備測試

本研究於柴油引擎後裝設尾氣後處理設備進行引擎尾氣中微粒數量濃度粒徑分布之探討，主要尾氣後處理設備分為濾煙器(DPF)、氧化觸媒

濾煙器(DOC+DPF)與新氧化觸媒濾煙器(DOC+DPF<sub>n</sub>)來探討其對引擎尾氣中微粒之影響，與不同尾氣後處理設備是否有差異。

#### 次微米微粒數量濃度

本研究以孔隙度 100 csi (cell per square inch)，圓形外徑 240 mm 和長度 305 mm 之氧化觸媒濾煙器為標準 DOC+DPF，進而比較未裝設觸媒之 DPF 與新 DOC+DPF<sub>n</sub>。表 4-4 為不同比例生質柴油在不同負載下氧化觸媒濾煙器(DOC+DPF)裝設與否微粒數量濃度，在使用 B2\_S50 油品時，0、25 和 50%負載未裝設 DOC+DPF 時，尾氣中微粒數量濃度分別為  $5.12 \times 10^7$ 、 $3.13 \times 10^7$  和  $4.97 \times 10^7$  #/cm<sup>3</sup>；裝設 DOC+DPF 後，微粒數量濃度降至  $6.06 \times 10^4$ 、 $2.18 \times 10^4$  和  $3.33 \times 10^4$  #/cm<sup>3</sup>。使用 B10 油品時，0、25 和 50%負載未裝設 DOC+DPF 時，尾氣中微粒數量濃度分別為  $5.50 \times 10^7$ 、 $2.37 \times 10^7$  和  $3.92 \times 10^7$  #/cm<sup>3</sup>；裝設 DOC+DPF 後，微粒數量濃度降至  $4.45 \times 10^4$ 、 $0.79 \times 10^4$  和  $1.47 \times 10^4$  #/cm<sup>3</sup>。使用 B20 油品時，0、25 和 50%負載未裝設 DOC+DPF 時，尾氣中微粒數量濃度分別為  $3.44 \times 10^7$ 、 $1.89 \times 10^7$  和  $3.27 \times 10^7$  #/cm<sup>3</sup>；裝設 DOC+DPF 後，微粒數量濃度降至  $5.52 \times 10^4$ 、 $0.77 \times 10^4$  和  $2.03 \times 10^4$  #/cm<sup>3</sup>。由此看出，裝設 DOC+DPF 後，引擎尾氣中微粒數量濃度有大幅降低的趨勢，大部分引擎操作條件下微粒數量濃度都降至  $10^4$  #/cm<sup>3</sup>，而且在 B10 和 B20 於 25%負載操作測試下，還有微

粒數量濃度降至  $10^3 \text{ \#/cm}^3$ ，可發現裝設 DOC+DPF 對於引擎尾氣所排放微粒數量濃度之改善。深入了解其減量效率，可由圖 4-12 不同油品不同負載下裝設 DOC+DPF 對引擎尾氣中微粒數量濃度減量效率。在三種油品各種負載條件下，減量效率為 99.84 至 99.97%，顯示 DOC+DPF 減量效果非常高，已達到將近百分之百之減量效果，而且由此可發現其效能不受油品影響；或是在不同引擎操作條件下，對 DOC+DPF 之效能也不會有所改變，其顯示針對不同油品與負載操作下，沒有減量效率高低之趨勢，而是都具有非常高的減量效率。

本研究使用另外兩種尾氣後處理設備，分別為沒有觸媒之 DPF 與 DOC+DPF<sub>n</sub>。表 4-5 為 DPF 與 DOC+DPF<sub>n</sub> 之引擎排放微粒數量濃度。使用 B2\_S50 情況下，在 0、25、50 和 75% 負載，數量濃度排放之結果依序為  $1.03 \times 10^4$ 、 $3.03 \times 10^4$ 、 $4.65 \times 10^4$  和  $4.97 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$ ；裝設新氧化觸媒濾煙器在 0、25、50 和 75% 負載之結果依序為  $68.54 \times 10^4$ 、 $12.53 \times 10^4$ 、 $5.69 \times 10^4$  和  $11.42 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$ 。將其與未裝設尾氣後處理設備之引擎尾氣微粒數量濃度排放相較，可看出其排放微粒數量濃度由  $10^7 \text{ \#/cm}^3$  降至  $10^4$ - $10^5 \text{ \#/cm}^3$ ，顯示此兩種尾氣後處理設備還是具有相當的效果。其減量效率如圖 4-13 濾煙器與氧化觸媒濾煙器對引擎尾氣中微粒數量濃度減量效率所示，DPF 之減量效率由 0、25、50 和 75% 負載依序為 99.97、99.98、99.96 和 99.89%，而 DOC+DPF<sub>n</sub> 之減量效率則為 98.49、99.63、99.90 和

99.79%。在此可看出使用未裝設 DOC 單獨使用 DPF 時，其濾煙器對引擎尾氣中微粒數量效果不變，還是高達 99.8% 以上。而在使用 DOC+DPF<sub>n</sub> 時，由數量濃度來看，除了在 50% 負載時，尾氣中微粒數量濃度達到  $10^4$  #/cm<sup>3</sup> 外，其餘排放微粒數量濃度都為  $10^5$  #/cm<sup>3</sup>；與其他尾氣後處理設備相較，都為使用 B2\_S50 油品加裝尾氣後處理設備，其於排放量都為  $10^4$  #/cm<sup>3</sup>，由此可看 DOC+DPF<sub>n</sub> 之減量效率低於 DOC+DPF 與 DPF。但由減量效率圖 4-13 中看出，其減量效率還是高達 98% 以上，顯示本研究之尾氣後處理設備之效率都很高，故雖然在數量上有些微差異，但在整體減量效率之差異是非常小的。

本研究 3 種尾氣後處理設備，各負載經過加權之平均如圖 4-14 所示，經由加權平均後之結果如下：B2\_S50 使用油品下，未裝設與裝設 DOC+DPF 之結果為  $4.51 \times 10^7$  和  $4.17 \times 10^4$  #/cm<sup>3</sup>，減量效率為 99.91%；使用 B10 油品下，未裝設與裝設 DOC+DPF 之結果為  $4.15 \times 10^7$  和  $2.55 \times 10^4$  #/cm<sup>3</sup>，減量效率為 99.94%；使用 B20 油品下，未裝設與裝設 DOC+DPF 之結果為  $2.95 \times 10^7$  和  $3.17 \times 10^4$  #/cm<sup>3</sup>，減量效率為 99.89%；B2 使用油品下，未裝設與裝設 DPF 之結果為  $3.95 \times 10^7$  和  $1.14 \times 10^4$  #/cm<sup>3</sup>，減量效率為 99.97%；B2\_S50 油品使用下，未裝設與裝設 DOC+DPF<sub>n</sub> 之結果為  $4.56 \times 10^7$  和  $3.46 \times 10^5$  #/cm<sup>3</sup>，減量效率為 99.24%。經過加權平均後，在三種油品分別加裝 DOC+DPF 之減量效率分別為 99.91、99.94 和 99.89%，看



出 DOC+DPF，不會隨著改變使用油品，而有較差的過濾效率；故 DOC+DPF 再油品變更或是在作業場所之柴油引擎機具，都是可以使用的尾氣後處理設備來進行環境的改善。Shibata et al. (2010)針對 DOC 和 DOC+DPF 進行為粒數量量測，結果顯示 DOC+DPF 對微粒數量濃度減量 99%以上，與本研究結果相同；過去研究也有相同趨勢(Frank et al., 2007; Kim and Choi, 2010)。Vaarslahti et al. (2004)研究顯示，未加熱樣本尾氣裝設 CRDPF 對微粒數量濃度之影響在累積峰微粒具有大量減量效果，而在高負載下凝核峰微粒經過 CRDPF 則有增量之趨勢，但在經過樣本加熱去除揮發性物質後，則不論累積峰與凝核峰尾氣經過 CRDPF 微粒數量都有減量效果。顯示樣本經過加熱後，不論在何種負載情況下，固態微粒數量都具有減量效果(Vaaraslahti et al., 2004)。而在相同油品(B2)下，使用 DOC+DPF、DPF 和 DOC+DPF<sub>n</sub>情況下，加權平均後減量效率分別為 99.91、99.97 與 99.24%；顯示在改變不同尾氣後處理設備後，在未裝設氧化觸媒器，其尾氣中微粒減量效果較 DOC+DPF 好，但其差異不大，故可表示裝設氧化觸媒器與否對於引擎尾氣中微粒數量沒有太大之差異。此結果為可預期的，由於氧化觸媒濾煙器其本身過濾微粒之地方為後段之濾煙器，前段之觸媒主要為氧化尾氣中氣態污染物與濾煙器再生時之催化作用，所以此結果為合理； Fillippo and Maricq (2008)針對 DPF 進行非揮發性固態微粒量測，研究結果也顯示單使用 DPF 對微粒數



量濃度減量效果高達 99% 以上，與本研究結果相當。倘若只需要去除尾氣中之微粒，可單獨使用濾煙器即可；但在柴油引擎尾氣中仍需注意半揮發性物質之排放(Filippo and Maricq, 2008)。在使用 DOC+DPF<sub>n</sub> 時，由研究結果可發現其針對柴油引擎尾氣中微粒相較於其他尾氣後處理設備減量效率有較差之情況，由此看出減量效率約少 0.7%，而造成此之原因可能為 DOC+DPF<sub>n</sub> 為新再生，再生過程中之高溫再生時，是否有微粒覆蓋於濾煙器壁上，而在第一次使用時被吹出，由於此為在氧化觸媒濾煙器中故存之微粒，並非引擎尾氣中所排放之微粒數量，故即會造成在處理效率上之差異；且此 DOC+DPF<sub>n</sub> 於一開始使用，因此其過濾處理效率尚未到達其最好之處理效率。但值得注意的是，整體而言其減量效率還是高達 99.24%，所以廣義上來說，新氧化觸媒器濾煙器與使用後之氧化觸媒濾煙器之減量效率不變；然而由於引擎尾氣包含高濃度微粒數量，因此此些微變化在數量上可能導致 10 倍之差異。

#### 次微米微粒數量濃度粒徑分布

不同負載下，裝設氧化觸媒濾煙器結果如圖 4-15 使用 B2\_S50 在不同負載下是否裝設氧化觸媒濾煙器之微粒數量濃度粒徑分布，(a)、(b) 和(c)圖分別為 0、25 和 50% 負載操作。由圖(a)中顯示，在引擎 0% 負載操作下，未裝設 DOC+DPF 之引擎原廢氣主要呈多峰分布，主要波峰位

置位於 11 nm，次要波峰位於 13 nm，另一位於 68 nm 之艾特坎峰；而在裝設 DOC+DPF 後，其微粒數量濃度粒徑分布主要波峰位於 11 nm，而其餘次要波峰則由於數量濃度太低，故在分布上呈現較不規則之分布，而此不規則分布中在 62 nm 有較高之數量濃度，但與 83 nm 之波峰相差不大，故可說經過 DOC+DPF 後，在 60-80 nm 處有一次要波峰。圖(b)中，在引擎 25% 負載操作下，未裝設 DOC+DPF 之引擎原廢氣主要成單峰分布，波峰粒徑位於 56 nm；裝設 DOC+DPF 後，微粒數量濃度粒徑分布呈多峰分布之情形，主要波峰位置位於 56 nm，而在 15、27、39 nm 都有零星之波峰存在，但其為數量濃度太少，故波峰在分布上較不平滑所產生。在圖(c)中，在引擎 50% 負載操作下，未裝設 DOC+DPF 之引擎原廢氣主要成單峰分布，波峰粒徑位於 68 nm；裝設 DOC+DPF 後，主要波峰位於 68.2 nm，在 39、47 和 56 nm 有零星之波峰，但其主要產生原因與 25% 負載時相同，故主要波峰位置依 68 nm 為主。綜合以上 3 種負載裝設 DOC+DPF 後之粒徑分布，可看出其主要波峰位置差異不大，尤其在 25% 和 50% 負載時，若忽略由於數量濃度太少而形成之零星波峰，對於經過 DOC+DPF 後之主要波峰位置與未裝設前位於同一位置，顯示 DOC+DPF 在 25% 和 50% 負載操作下，不會改變引擎尾氣中微粒之粒徑大小。而在 0% 負載之操作下，主要波峰位置經過 DOC+DPF 後維持不變，但在次要波峰則有些微之變化，深入探討各粒徑之減量效率，如圖

4-16 為 B2\_S50 在 0% 負載操作下尾氣中微粒數量濃度經過 DOC+DPF 之減量效率粒徑分布，可發現除了在 349-692 nm 粒徑範圍，其減量效率較差之外，其餘粒徑之減量效率沒有太大的差異，故在 0% 負載經過 DOC+DPF 之次要波峰位置與原廢氣主要差異來源推測為微粒數量濃度太低所致。

加權平均數量濃度粒徑分布之結果如圖 4-17 為使用不同油品是否裝設氧化觸媒濾煙器之微粒加權數量濃度粒徑分布。圖(a)為 B2\_S50 油品下加權平均，未裝設 DOC+DPF 前之微粒粒徑分布呈多峰分布，主要波峰位置位於 11 nm，次要波峰位於 13 nm，另一波峰則位於 62 nm；裝設 DOC+DPF 後之微粒粒徑分布呈雙峰分布，主要波峰位於 11 nm，次要波峰位於 62 nm。圖(b)為 B10 油品下加權平均，未裝設 DOC+DPF 前之微粒粒徑分布呈雙峰分布，主要波峰位置位於 15 nm，次要波峰位於 68 nm；裝設 DOC+DPF 後之微粒粒徑分布呈雙峰分布，主要波峰位於 11 nm，次要波峰位於 47 nm。圖(c)為 B20 油品下加權平均，未裝設 DOC+DPF 前之微粒粒徑分布呈雙峰分布，主要波峰位置位於 16 nm，次要波峰位於 68 nm；裝設 DOC+DPF 後之微粒粒徑分布呈雙峰分布，主要波峰位於 11 nm，次要波峰位於 92 nm。由此看出，B2\_S50 在裝設氧化觸媒濾煙器後，除了 13 nm 之微粒波峰，其餘波峰位置與未裝設濾煙器前相同。而將 13 nm 範圍計算其減量效率為 99.87%，而鄰近之粒徑

12 與 15 nm 之減量效率分別為 99.84% 和 99.90%，由此可知在 13 nm 之減量效率與其他粒徑之減量效率相當，故其粒徑分布可能由於最小粒徑範圍之數量濃度太高而降低了其分布，故在使用 B2\_S50 之油品對於 DOC+DPF 之減量效率粒徑分布上，可以當作對粒徑分布無影響。使用 B10 油品時，在次要波峰之差異主要由未裝設 DOC+DPF 之波峰 68 nm 裝設後波峰位置變至 47 nm，此可發現經過 DOC+DPF 波峰位置有變小的趨勢。而在使用 B20 油品時，次要波峰之差異主要由未裝設 DOC+DPF 之波峰 68 nm 裝設後波峰位置變至 92 nm，此顯示經過 DOC+DPF 後波峰位置有變小的趨勢。但其主要在各粒徑之減量效率都高達 99% 以上，沒有明顯之不同，故在經過濾煙器後之微粒粒徑波峰位置改變，在此兩種油品上，其可能之成因為油品本身即具有此差異，故在經過 DOC+DPF 後才會有此差異的情況產生；而可能之另一原因為經過 DOC+DPF 後微粒數量濃度太低所導致在粒徑分布上之差異。在 B10 與 B20 油品使用下，其數量濃度確實低於 B2\_S50 之數量濃度，故又裝設 DOC+DPF 後，其數量濃度又顯得更少，故其對於粒徑分布差異影響上扮演著重要的角色。

單使用濾煙器而未裝設氧化觸媒器，在不同負載之結果如圖 4-18 使用 B2\_S50 在不同負載下是否裝設濾煙器之微粒數量濃度粒徑分布，(a)、(b)、(c)和(d)圖分別為 0、25、50 和 75% 負載操作。由圖(a)中顯示，在



引擎 0% 負載時，未裝設 DPF 之引擎原廢氣主要呈雙峰分布，主要波峰位於 15 nm，次要波峰位於 11 nm，另一位於 68 nm 之艾特坎峰；而裝設 DPF 後，其微粒數量濃度粒徑分布主要波峰位於 11 nm，而其餘次要波峰則由於數量濃度太低，故在分布上呈現較不規則之分布。圖(b)中，在引擎 25% 負載操作下，未裝設 DOC+DPF 之引擎原廢氣主要成單峰分布，波峰粒徑位於 56 nm；裝設 DOC+DPF 後，微粒數量濃度粒徑分布呈多峰分布之情形，而由於其數量濃度太少，在分布上較不平滑故無法明確指出其波峰位置，但主要可觀察到波峰大致位於 40-60 nm 範圍。圖(c)中，在引擎 50% 負載操作下，未裝設 DOC+DPF 之引擎原廢氣主要成單峰分布，波峰粒徑位於 75 nm；裝設 DOC+DPF 後，微粒數量濃度粒徑分布呈多峰分布之情形，主要波峰位於 56 nm，其餘還有位於 17、191 與 454 nm 之零星波峰。圖(d)中，在引擎 75% 負載操作下，未裝設 DOC+DPF 之引擎原廢氣主要成單峰分布，波峰粒徑位於 92 nm；裝設 DOC+DPF 後，微粒數量濃度粒徑分布呈多峰分布之情形，主要波峰大致位於 50-150 nm，而在 30 和 191 nm 範圍，則有另外兩個較小之波峰存在。綜合以上四種引擎負載情形，於未裝設 DPF 與裝設 DPF 後之比較，可發現在 0 與 25% 負載操作下，在微粒粒徑分布上，兩者大致無太大之差異，顯示在此兩負載情況下引擎尾氣裝設 DPF 在微粒數量濃度粒徑分布上，各粒徑減量效率相同，故在分布上無差異。而在 50 與 75%



負載操作下，微粒數量濃度粒徑分布似乎有改變的趨勢，故深入了解其減量效率粒徑分布，結果如圖 4-19 B2\_S50 在不同負載操作下尾氣中微粒數量濃度裝設 DPF 之減量效率粒徑分布。圖(a)為 50% 負載之粒徑分布減量效率，由圖中可看出在 300 nm 粒徑以下之微粒，其各粒徑減量效率都高達 99% 以上，故 DPF 在粒徑分布上無造成影響，因此在經過 DPF 後所產生之 17 和 191 nm 部分之波峰，單純為經過 DPF 後數量濃度太低所產生；但在 300 nm 以上粒徑至 600 nm 範圍，其減量效率較差甚至為負值，探討此原因主要為在 50% 負載未裝設 DPF 前，原引擎廢氣其在 300-600 nm 範圍之微粒數量，其原本就較少，甚至到達個位數之微粒，而引擎每次運轉所排放之廢氣本身即會產生些許差異，故於裝設 DPF 時，只要有些許微粒之排放，即會造成減量效率粒徑分布呈現較差甚至負值之情形，所以在裝設 DPF 於 454 nm 所產生之波峰即為此所致。圖(b)為 75% 負載之粒徑分布減量效率，其分布主要與 50% 負載相同，在 300-600 nm 部分有較差之減量效率。但相較之下，可發現在 75% 負載減量效率在 15 nm，減量效率相對於其他粒徑較差，但減量效率還是高達 99.4%，故在此對粒徑分布不造成任何影響。而在經過 DPF 後，所產生之兩個波峰 30 和 191 nm，減量效率分別為 99.75 和 99.84%，DPF 在此兩粒徑之減量效率並無較差之趨勢，因此 DPF 對於粒徑分布上並沒有影響。

加權後之粒徑分布結果如圖 4-20 裝設濾煙器與否之微粒加權數量

濃度粒徑分布。未裝設 DPF 之粒徑分布主要呈雙峰分布，主要波峰位於 15 nm，次要波峰位於 75 nm；裝設 DPF 後微粒數量濃度粒徑分布還是呈雙峰分布之情形，主要波峰位於 83 nm，次要波峰位於 11 nm。由此看出裝設 DPF 後，波峰位置差異不大，約在 8 nm 左右。此結果與各負載之結果相當，故可說明在引擎尾氣裝設 DPF 後，其在 300 nm 以下各粒徑之減量效率都高達 99% 以上，故裝設 DPF 對於微粒數量濃度粒徑分布上並不會造成影響。

裝設新氧化觸媒濾煙器之結果，如圖 4-21 使用 B2\_S50 在不同負載下是否裝設新氧化觸媒濾煙器之微粒數量濃度粒徑分布，(a)、(b)、(c) 和(d)圖分別為 0、25、50 和 75% 負載操作。由圖(a)中顯示，在引擎 0% 負載時，未裝設 DOC+DPF<sub>n</sub> 之引擎原廢氣主要呈雙峰分布，主要波峰位於 16 nm，次要波峰位於 68 nm 之艾特坎峰；而裝設 DOC+DPF<sub>n</sub> 後，其微粒數量濃度粒徑分布主要波峰位於 11 nm，次要波峰位於 82.8 nm。圖(b)中顯示，在引擎 25% 負載時，未裝設 DOC+DPF<sub>n</sub> 之引擎原廢氣主要呈雙峰分布，主要波峰位於 62 nm，而在 12 nm 有一較小之次要波峰；而裝設 DOC+DPF<sub>n</sub> 後，其微粒數量濃度粒徑分布還是呈雙峰分布，主要波峰位於 47 nm，次要波峰位於 12 nm。由此可看出在引擎 25% 負載時，裝設 DOC+DPF<sub>n</sub> 後，雖然在主要波峰位置與原廢氣有些許之差異，但其主要由於數量濃度太低所導致，且在次要波峰位置無論經過 DOC+DPF<sub>n</sub>

與否都位於相同粒徑範圍，故可說明在引擎 25% 負載操作下，微粒數量濃度粒徑分布經過 DOC+DPF<sub>n</sub> 沒有變化。圖(c)中顯示，在引擎 50% 負載時，未裝設 DOC+DPF<sub>n</sub> 之引擎原廢氣主要呈單峰分布，主要波峰位於 62 nm；而裝設 DOC+DPF<sub>n</sub> 後，其微粒數量濃度粒徑分布呈單峰分布，主要波峰位於 68 nm，與未裝設 DOC+DPF<sub>n</sub> 前差異不大。圖(d)中顯示，在引擎 75% 負載時，未裝設 DOC+DPF<sub>n</sub> 之引擎原廢氣主要呈單峰分布，主要波峰位於 101 nm；而裝設 DOC+DPF<sub>n</sub> 後，其微粒數量濃度粒徑分布呈多峰分布，主要波峰位於 19 nm，次要波峰位於 62-83 nm。由此顯示裝設 DOC+DPF<sub>n</sub> 在引擎 75% 負載操作時，引擎尾氣中微粒數量濃度粒徑分布特性有相當差異，在未裝設 DOC+DPF<sub>n</sub> 前，主要波峰 101 nm 裝設 DOC+DPF<sub>n</sub> 後，還是存在於尾氣中；但在 19 nm 之波峰，具有相當高的數量濃度，且為原引擎廢氣中不存在之波峰。對此，本研究對其減量效率粒徑分布做深入了解，結果如圖 4-22 為 B2\_S50 在 75% 負載操作下尾氣中微粒數量濃度裝設 DOC+DPF<sub>n</sub> 之減量效率粒徑分布，由此圖中顯示在 300-600 nm 部分有較差之過濾效率，此結果與其餘兩種尾氣後處理設備結果相同；但在 25 nm 以下粒徑範圍，可看出與其餘兩種尾氣後處理設備差異之處，造成此之差異可能為再生時未被排出之微粒儲存於濾材中，因此再生後第一次使用時，可能由於高負載情況下而被吹出。儘管其減量效率還是高達 90% 以上，但與先前 99% 以上減量效率相較，若在

高濃度數量下，此差異即會造成相當大的差異。故可發現，在引擎 75% 負載時，使用 DOC+DPF<sub>n</sub> 會有較差之過濾效率。

加權後之粒徑分布結果如圖 4-23 裝設新氧化觸媒濾煙器與否之微粒加權數量濃度粒徑分布。未裝設 DPF 之粒徑分布主要呈雙峰分布，主要波峰位於 16 nm，次要波峰位於 68 nm；裝設 DPF 後微粒數量濃度粒徑分布還是呈雙峰分布之情形，主要波峰位於 11 nm，次要波峰位於 75 nm。由此看出，經過加權後之微粒數量濃度粒徑分布在裝設新氧化觸媒濾煙器與否沒有太大之差異，故在此顯示裝設 DOC+DPF<sub>n</sub> 加權後對粒徑分布沒有影響。

比較三種尾氣後處理設備對於引擎尾氣中微粒數量濃度減量是否有差異，由圖 4-24 尾氣後處理設備減量效率粒徑分布，針對各種尾氣後處理設備經過 4-9 次測量後，平均而得。由圖中可看出在(a)DOC+DPF 與 (b)DPF 使用時，尾氣後處理設備對於微粒減量效率粒徑分布上，在 300 nm 以下微粒都呈齊頭式減量，故對微粒數量濃度粒徑分布無太大之影響(Frank et al., 2007; Kim and Choi, 2010; Zhang et al., 2011)；主要都在 300-600 nm 粒徑範圍有較差之減量效率，造成此之原因主要有兩種：第一為引擎本身在此處排放之微粒數量濃度較少，故在經過尾氣後處理設備後，有些許微粒數量排出即會造成減量效率較差(Vaaraslahti et al., 2004)；第二則為微粒本身藉由擴散、重力、攔截和碰撞等機制沉降，但



在 100-1000 nm 粒徑範圍，由於其粒徑關係，在擴散與攔截機制都與其他粒徑範圍相較有較差之沉降效率。所以使用尾氣後處理設備對引擎中尾氣微粒進行數量攔截，本身在此範圍相對來說就具有較差捕集效率；故在此處減量效率差為可以預期之結果(Filippo and Maricq, 2008; Shibata et al., 2010)。然而在圖(c)裝設 DOC+DPF<sub>n</sub> 時之結果，與其他兩者尾氣後處理設備相比，雖然在 300-600 nm 範圍具有相同的趨勢；但在 25 nm 以下之粒徑，其減量效率卻不及其他兩種尾氣後處理設備。而造成此之原因主要也有兩個：第一為此氧化觸媒濾煙器為第一次使用，故在捕集效率上，尚未達到其最好之捕集效率，因此相較於其他兩種尾氣後處理設備有較差的結果；第二為新氧化觸媒濾煙器是經由再生後之濾煙器，而在再生時經由柴油高溫燃燒，在尚未將再生時之微粒完全排出，而於再生後第一次使用時會有殘餘之微粒排出，因而造成減量效率較差。

#### 4.2.4 氧化觸媒濾煙器再生過程之數量排放特性

DOC+DPF 使用一段時間後，濾材孔隙上會累積大量碳粒，增加引擎排放背壓，導致引擎馬力輸出與引擎機械本身過熱等問題。濾材內堆積之碳粒可藉由燃燒將碳氧化反應成 CO<sub>2</sub> 排出，藉此恢復濾煙器過濾功能，即為再生。本研究於 DOC+DPF 前端，噴入柴油燃燒藉以提高排氣



溫度至 600-800 °C，以點燃粒狀污染物，達到再生效果。

研究結果如圖 4-25 所示，其為在生過程中引擎逐秒所排放之數量濃度，DOC+DPF 再生前之微粒數量濃度排放為  $1.9 \times 10^4 - 6.5 \times 10^5 \text{ \#/cm}^3$ ，再生過程則有  $1.1 \times 10^7 \text{ \#/cm}^3$  微粒排放。可發現 DOC+DPF 於再生時，會排放大量微粒，且此微粒數量與沒再生一般使用時相比高達 1000 倍。將其搭配再生時尾氣中溫度變化，如圖 4-26 所示，圖中 DOC in 為 DOC 前引擎燃燒後實際溫度，DOC out 為 DOC 後實際引擎溫度加上噴入柴油燃燒之溫度，DPF out 則為濾煙器燃燒後溫度。圖中 DOC out 與 DPF out 交接點，在此點前 DOC out 直線增加即為噴入柴油但 DPF 尚未燃燒階段，此交點後即為濾煙器實際開始燃燒再生。將其對照微粒數量濃度，可發現在噴入柴油初期，微粒數量濃度排放非常低約  $10^4 \text{ \#/cm}^3$ ，推測此主因可能為噴入柴油瞬間，在未達到燃燒溫度前 ( $< 600 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 會使得 DOC 潮濕，因而使尾氣過濾效率變差。而在達到  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  後，DOC 開始燃燒但 DPF 未燃燒時，則有  $10^6 \text{ \#/cm}^3$  的數量排放，相較於未再生前雖然有 100 倍內的增量，但在實際 DPF 再生時，則有 1000 倍的排放。將再生過程之微粒數量濃度排放中較具代表性之區段，區分為 DOC+DPF 再生前、中及後比較其數量濃度，結果如圖 4-27 所示。DOC+DPF 再生前，引擎尾氣中微粒數量濃度平均排放量為  $2.74 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$ ；再生過程中，引擎尾氣中微粒數量濃度平均排放量為  $6.50 \times 10^6 \text{ \#/cm}^3$ ；而再生後，引擎尾氣中微粒

數量濃度平均排放量為  $6.02 \times 10^5 \text{ \#/cm}^3$ 。由此可看出，DOC+DPF 於再生時，有非常高之數量濃度，平均高於再生前 237 倍，甚至部份數量濃度排放相當於未裝設 DOC+DPF 之引擎原廢氣，此結果為合理的。由於噴入柴油於 DOC+DPF 促使其燃燒，而燃燒過後之廢氣即直接被排出量測，因此相當於未經過尾氣候處理設備之引擎原氣，故於 DOC+DPF 再生時有相當高之排放。再生後之 DOC+DPF，引擎尾氣中微粒數量濃度平均排放量為  $6.02 \times 10^5 \text{ \#/cm}^3$ ，顯示 DOC+DPF 再生後，尚有些許於再生過程中殘留於管壁之微粒被吹出，因此相對於再生前有 22% 增量。綜合上述顯示，DOC+DPF 於再生時，會有相當高微粒數量產生，而造成此主要因素有噴入柴油使得燃料過剩，因而產生更多碳粒排放；再者為累積於濾材孔隙中之碳粒於再生過程中被排出；在 DOC+DPF 處燃燒，尾氣通過速度快，燃燒時間縮短增加不完全燃燒機率，因而導致 DOC+DPF 於再生時有大量微粒產生。相關研究也指出，DPF 再生時對於尾氣中微粒數量濃度增量 1-1000 倍，且受揮發性物質影響(Mohr et al., 2006)。

### 4.3 穩態測試：定容積稀釋系統

為了模擬柴油車實際排放於大氣環境之情形，本研究於 CVS 採樣系統進行 4 種不同轉速操作條件下，引擎尾器中微粒數量濃度粒徑分布情形。

#### 4.3.1 次微米微粒數量排放濃度與係數

穩態測試下不同轉速之次微米微粒數量濃度與係數如表 4-6，顯示由惰轉、低、中和高轉速，其排放係數依序為  $11.65 \times 10^{15}$ 、 $0.61 \times 10^{15}$ 、 $1.48 \times 10^{15}$  和  $2.67 \times 10^{15}$  #/bhp-hr；顯示，在惰轉時有非常高數量排放係數，相較於低轉速操作時約高 17 倍以上，其餘轉速結果則保持相同趨勢。造成此之主要原因為：惰轉時相對於不同轉速操作條件下，其馬力非常小，若以排放係數來看引擎尾器中微粒數量排放量，即可能會產生引擎惰轉時高排放之謬誤。因此以數量濃度進行不同轉速之探討，引擎由惰轉、低、中和高轉速排放數量濃度依序為  $3.67 \times 10^8$ 、 $2.93 \times 10^8$ 、 $4.10 \times 10^8$  和  $9.86 \times 10^8$  #/cm<sup>3</sup>；且各 RSD 都很小，表示在穩態測試情況下，微粒數目排放特性有良好的再現一致性。不同轉速之增量比例如圖 4-28 所示，由圖中可看出微粒數量濃度在惰轉時，高於低轉速操作之排放約 25%；而由低轉速開始，引擎尾氣中之微粒數量濃度隨轉速增加而增多，在中轉速與高轉速時，分別增加 39% 和 234%。由此也可看出，在高轉速時相

較於低轉速引擎尾氣中微粒數量濃度增加相當多。在前述 4.2.1 不同負載對引擎尾氣中微粒數量濃度影響時，雖然有相同之趨勢；但增量幅度卻不像此顯著，其也呼應本研究於 4.3.3 探討引擎操作轉速與負載對微粒數量相關性結果，顯示引擎尾氣中微粒數量濃度受轉速影響較大。相關研究也顯示，引擎轉速增加也會使得尾氣中微粒數量排放增加(Kittelson et al., 2004; Morawska et al., 1998; Wang et al., 2006)；主要原因高速行駛下，廢氣溫度及排氣量增加，因此導致尾氣中微粒數量排放增加(Kittelson et al., 2004; Zhu et al., 2002a)。團隊中，相同採樣條件下，質量排放係數由高至低分別為低、高與中轉速，其結果雖然與數量濃度有些無差異，但主要排放趨勢還是隨轉速而有較高之排放(陳勳融, 2011)。

#### 4.3.2 次微米微粒數量排放係數粒徑分布

圖 4-29 為穩態循環下不同轉速之次微米微粒數量濃度粒徑分布。在這四個測試條件下，其粒徑分布都呈現單峰分布，顯示在穩態時，其產生粒徑穩定且固定；在惰轉下，主要波峰位於 30 nm；在低轉速下，其粒徑分布主要波峰位於 51 nm 且集中；在中轉速下，其粒徑分布主要波峰位於 30 nm；而在高轉速時，其粒徑分布主要波峰位於 17 nm；可看出引擎轉速增加，引擎尾氣產生的微粒粒徑有越來越小的趨勢。

此結果與 4.2.1 不同負載時，趨勢不一致，但值得注意為在此樣本未



進行加熱，因此比較基準不同，也顯示引擎尾氣在一般環境若不加熱情況下，引擎尾氣中則會伴隨著大量揮發性物質。此結果與 Kittelson et al. (2004)在 Minnesota 公路研究，將車輛行駛速度分為 0 - 32、32 - 80 和 > 80 km/h 等 3 種速度進行探討，其微粒幾何平均粒徑依序為 25、20 和 14 nm，由此可看出隨著行車速度增加所排放之微粒也隨之變小，Vitanen et al. (2004)研究結果也有相同之趨勢(Kittelson et al., 2004; Virtanen et al., 2004)。Neer and Koylu (2006)更進一步指出，引擎尾氣中微粒粒徑隨著負載增加而變大，隨轉速增加而變小。主要原因為當引擎尾氣中負載增加時，注油量也跟著增加，使得燃料空氣比上升，導致更多微粒核化與成長，因此有較大粒徑之微粒被排出；然而，當引擎轉速增加時，尾氣在引擎腔室中燃燒時間與滯留時間都縮短，因此影響減少氧化速率與微粒成長時間，導致粒徑較小之微粒被排出。作者也提出 Zhu et al. (2005)發現於引擎加速初期，微粒粒徑會增大，而後隨著溫度上升而粒徑變小；與本研究結果於惰轉時增加至低轉速時，粒徑相對變大而後隨轉速增加粒徑變小相當。但值得注意為，引擎尾氣排氣溫度受到負載與轉速影響，因此若單視溫度來辨別其對尾氣中微粒粒徑影響，將可能導致誤解(Neer and Koylu, 2006; Zhu et al., 2005)。故在此粒徑趨勢與 4.2.1 結果差異除了樣本加熱外，其可能為微粒本身之趨勢即不同。



## 4.4 美國暫態循環測試

本研究於美國暫態循環運轉條件中，針對使用 B1\_S50、B1\_S10、B10、B1/DOC 及 B1/DOC+DPF 參數，來探討車輛行駛於道路之各種引擎操作條件在一般大氣環境下，引擎尾氣中數量濃度及粒徑分布。

### 4.4.1 次微米微粒數量排放係數與濃度

#### 冷熱啟動

數量排放濃度結果如表 4-7 美國暫態循環測試下五種測試條件之次微米微粒數量排放係數與濃度所示，由表中可看出每個暫態循環(20 分鐘)約有 3-5 個掃描，且分為冷啟動與熱啟動進行微粒數量量測，熱啟動量測次數較多，以平均顯示，故最多有到達 28 個掃描。單就本研究 5 種測試中冷、熱啟動結果來看，B1\_S50、B10 和 B1/DOC+DPF 為熱啟動時微粒數量濃度較高；而 B1\_S10 和 B1/DOC 中則冷啟動時微粒數量濃度較高，故就引擎冷熱啟動上，對微粒數量濃度並無一致的趨勢。

#### 不同油品

不同油品測試，在此主要有 3 種: B1\_S50、B1\_S10 和 B10。針對改變油品對引擎尾氣影響來看(表 4-7)，就不同油品冷啟動而言，使用 B1\_S50、B1\_S10 及 B10 之微粒數量排放係數分別為  $1.64 \times 10^{15}$ 、 $3.57 \times 10^{15}$  及  $8.23 \times 10^{14}$  #/bhp-hr；在熱啟動部分，B1、S10 及 B10 排放之數量排放

係數分別為  $2.09 \times 10^{15}$ 、 $1.26 \times 10^{15}$  及  $1.21 \times 10^{15}$  #/bhp-hr。由此看出，除了 B1\_S10 冷啟動操作狀態下，其他不同油品在冷、熱啟動下對於 B1\_S50 都有減量的趨勢。而針對冷與熱啟動之加權平均值而言，如圖 4-30 為五種測試條件之次微米微粒數量加權排放係數與減量效率所示，B1\_S50 之數量放係數最高，接著依序為 B1\_S10，最低為 B10，其排放係數分別為  $2.00 \times 10^{15}$ 、 $1.59 \times 10^{15}$  及  $9.86 \times 10^{14}$  #/bhp-hr。Wang et al. (2006) 研究結果顯示，FTP 運轉下，使用一般市售超級柴油之微粒排放為  $1.2 \times 10^8$  #/cm<sup>3</sup>；與本研究之 B1\_S50 微粒數量排放濃度為  $6.5 \times 10^8$  #/cm<sup>3</sup> 結果接近。由此針對不同油品，在相同未加裝尾氣後處理設備下，以一般市售超級柴油 B1\_S50 為基準，使用低硫柴油 B1\_S10 雖然在冷啟動有高出 B1\_S50 之排放，但冷熱加權平均後，整體排放量還是低於 B1\_S50，且具有 21% 的減量效果，其表示雖然使用 B1\_S10 於剛啟動之車輛會有較多污染排放，但行駛完總路程後，還是具有減量的效果。此結果也與 Wang et al. (2006) 比較低硫柴油與一般市售柴油結果顯示，微粒數量減量 19% 結果相當。Kittelson et al. (2006) 研究也指出，油品中含硫量為半揮發性凝核峰微粒生成來源，因此降低柴油中含硫量對於微粒數量濃度有降低的之趨勢(Kittelson et al., 2006)。而使用添加 10% 生質柴油 B10 不論冷熱啟動，都比 B1\_S50 排放較少微粒，於整體加權時則具有 51% 減量效果，若再考量能源問題，則生質柴油對於尾氣中微粒數量減量為具有相當潛力之

替代能源。

### 尾氣後處理設備

加裝尾氣後處理設備分為氧化觸媒器與氧化觸媒濾煙器兩種，由表中可看出，在冷啟動中，B1\_S50、B1/DOC 和 B1/DOC+DPF 之微粒數量排放係數分別為  $1.64 \times 10^{15}$ 、 $4.93 \times 10^{14}$  及  $0.50 \times 10^{13}$  #/bhp-hr；熱啟動則為  $2.09 \times 10^{15}$ 、 $4.35 \times 10^{14}$  及  $0.63 \times 10^{13}$  #/bhp-hr，看出 B1\_S50 冷熱啟動在加裝尾氣後處理設備後都為減量，由於尾氣後處理設備是在引擎排氣後加裝，故本身之冷熱啟動排放應與其無關，不論尾氣微粒中多或少，其處理效率一致，故此冷熱排放結果合理。冷與熱啟動之加權平均而言(表 4-7)，B1\_S50、B1/DOC 及 B1/DOC+DPF 依序為  $2.00 \times 10^{15}$ 、 $4.43 \times 10^{14}$  及  $6.14 \times 10^{12}$  #/bhp-hr。因此，在相同油品下，加裝尾氣後處理設備由圖 4-29 中可知，加裝氧化觸媒器 B1/DOC 具有 78% 的減量；Kim and Choi (2010)和 Zhang et al. (2010)研究中顯示 DOC 對引擎尾氣中微粒數量約有 20-30% 減量效果(Kim and Choi, 2010; Zhang et al., 2011)；然而，Frank et al. (2007)、Filippo and Maricq (2008)和 Shibata et al. (2010)研究顯示 DOC 對引擎尾氣中微粒數量沒有顯著之差異。在本研究中減量推論為實驗使用之 DOC，塗敷觸媒之陶瓷結構對微粒也具有相當減量效果(Filippo and Maricq, 2008; Frank et al., 2007; Shibata et al., 2010)。而加裝 DOC+DPF

減量效果高達 99.7%，顯示於引擎尾氣末端加裝後處理設備，即可使引擎尾氣中微粒有大幅度的改善。

綜合上述柴油引擎尾氣中次微米微粒數量排放係數範圍為  $6.14 \times 10^{12} - 2.00 \times 10^{15} \text{ \#/bhp-hr}$ ，將其換算為行駛每公里排放微粒數量為  $5.53 \times 10^{12} - 2.09 \times 10^{15} \text{ \#/km}$  (表 4-7)；由此可知，本研究量測得排放係與表 2-4 先進國家之排放係數相似 ( $1.8 \times 10^{12} - 7.3 \times 10^{15} \text{ \#/km}$ )；而在加裝濾煙器時，排放係數落在較低的範圍。其對微粒數量減量效率，可使出廠年份較久之車輛對於引擎已無法改善時，於末端進行控制；但還是須注意其效率雖高，但還是取決於引擎尾氣原氣污染物之排放量，若污染物排放量相當高，雖然會降低，但將其換算成微粒數量濃度則為  $1.96 \times 10^6 - 6.48 \times 10^8 \text{ \#/cm}^3$ ，與一般大氣環境文獻相比較，台中地區交通道路旁與測站次微米微粒數量濃度分別為  $2.2 \times 10^4 - 2.5 \times 10^5 \text{ \#/cm}^3$  (王顥婷, 2009)。結果顯示，柴油引擎尾氣之排放數量濃度遠遠高於一般大氣數量濃度，加裝尾氣後處理設備後則較接近交通道路旁所測得之微粒濃度，約為道路旁 8 倍，還是有相當高之排放量，故還是需於源頭來進行控制才是最有效之方法。

由此可知，在美國暫態循環測試下，使用一般市售超級柴油微粒數量排放係數與濃度約  $10^{15} \text{ \#/bhp-hr}$  與  $10^8 \text{ \#/cm}^3$ ，遠高於一般大氣環境。在控制技術中，針對油品的改變，對微粒具有 20-50% 的減量，而在尾氣



後處理設備對於引擎尾氣中微粒具有優良的控制效果，單獨使用氧化觸媒器對於尾氣微粒數量即具有相當程度減量(78%)，若再加上濾煙器使用氧化觸媒濾煙器，對微粒則有 99.7%的減量效果。在質量量測上，有具有相同減量趨勢，改變使用油品有 6-25%減量效果，使用尾氣候處理設備則有 35-94%減量效果(陳勳融, 2011)。由此可知，此兩種尾氣後處理設備對於改善引擎尾氣微粒數量與質量都有良好的成效。

#### 4.4.2 次微米微粒數量排放係數粒徑分布

圖 4-31 為五種測試條件之次微米微粒數量排放係數粒徑分布。在一般市售超級柴油 B1\_S50 測試條件下，其粒徑分布呈多峰分布，主要波峰(排放係數最高)位於 25 nm，次要波峰位於 43 nm，和另一位於 92 nm 之較小波峰。

##### 不同油品

由 4-31(a)圖中，看出使用低硫柴油 B1\_S10 主要呈雙峰分布，主要之波峰位於 36 nm，另一次要波峰位於 137 nm，將其與 B1\_S50 相比較，發現使用低硫柴油排放之微粒波峰位置有較大的趨勢，且在 < 50 nm 以下之微粒都比 B1\_S50 少。由此可知，降低柴油中含硫量對於凝核峰(< 30 nm)之微粒有減量的效果，而這些微粒在量測範圍主要都為較小粒徑微粒。生質柴油 B10 微粒粒徑也呈現雙峰分布，主要之波峰位於 19 nm，



另一次要波峰位於 83 nm，將其與 B1\_S50 相比較，可發現粒徑波峰有些微變小，但差異都在 10 nm 以內，故整體波峰形狀差異不大，可推論使用 B10 造成尾氣中微粒粒徑整體變小，但分布趨勢一樣。整體而言，使用不同油品對於數量粒徑分布上，主要都呈雙峰或多峰分布，但低硫柴油在凝核峰無明顯波峰，相關文獻指出柴油中之硫成分為組成凝核峰微粒的主要來源，故降低柴油中含硫量對於 < 20 nm 之微粒有抑制作用 (Kittelson, 2006)；生質柴油 B10 在凝核峰之微粒相較於 B1\_S50 有增量的趨勢，Heikkilä (2009) 於研究中使用油菜籽生質柴油與一般市售超級柴油比較，也具有相同的結果，而造成此結果可能為生質柴油包含許多高黏性之甘油與酯類，且包含較多雜質，其可能為形成凝核峰微粒主要來源(Heikkila et al., 2009)。

#### 加裝尾氣後處理設備

圖 4-31 (b) 為加裝尾氣後處理設備之粒徑分布，在加裝氧化觸媒器 B1 /DOC 下，其粒徑分布之主要波峰(排放係數最高)位於 21 nm，另有一次要波峰位於 51 nm；而在加裝氧化觸媒濾煙器 B1/DOC+DPF 下，其粒徑分布主要波峰與 B1/DOC 大致相似，但在 11 nm 和 214 nm 出現較前兩波峰較高，而在 214 nm 下出現最高波峰。與 B1\_S50 比較，主要波峰從 B1\_S50 的 25 nm 變為 21 nm；次要波峰從 B1\_S50 的 43 nm 變為 51 nm，

而在 B1\_S50 另一較不顯著之波峰 92 nm 在此可能為數量濃度相較當對來說較低，故在此無波峰。由此可看出，於引擎尾氣端加裝氧化觸媒器 (B1/DOC)，對於尾氣中微粒數量排放係數粒徑分布僅小幅度之變化外(< 10 nm)，沒有太大之差異，且次微米微粒數量排放係數粒徑分布呈現多峰分布(multimodal)，分別位於凝核峰與累積峰。加裝氧化觸媒濾煙器 (B1/DOC+DPF)之粒徑分布，將其與 B1\_S50 相比較，可發現相同位於 27 和 56 nm 之波峰，此兩波峰與 B1/DOC 也具有相同結果，且在 90 nm 左右也有一小波峰與 B1\_S50 之波峰相當，此三波峰顯示微粒經過氧化觸媒濾煙器對微粒粒徑沒有造成大量的改變；但值得注意的是，在 B1/DOC+DPF 之最高兩個波峰 11 和 214 nm，在 B1\_S50 時並無此波峰存在。因此，深入探討 B1\_S50 經過 DOC+DPF 後，各粒徑之微粒過濾效率，如圖 4-32 氧化觸媒濾煙器對不同粒徑微粒之補集效率，可看出在粒徑 214 和 600 nm 範圍之微粒，其過濾效率相較於其他粒徑差，其與微粒本身在此範圍捕集效率即較差有關(詳見 4.2.3)，因此在 214 nm 之波峰即為 DOC+DPF 減量效率較差所致。而另一主要波峰 11 nm 氧化觸媒濾煙器之效率高達 99%，但在分布上卻有相當高之波峰，故造成此一波峰之原因可能為:(1)引擎廢氣中本身在粒徑 10 nm 處即有相當濃度之微粒；(2)經過氧化觸媒濾煙器後尾氣中微粒數量大量降低，而尾氣中累積峰(100-1000 nm)之微粒原本為提供凝核峰微粒膠結之表面，但因微粒數

量減少而使得膠結表面大幅度減少，使得微粒保持其凝核峰被測得。此外，從圖 4-30 中可知，引擎廢氣中絕大部分(> 90%)之微粒數量是由粒徑小於 100 nm 之超細微粒所貢獻。

綜合上述結果，尾氣加裝 DOC 與 DOC+DPF 對於微粒數量排放係數粒徑分布之影響不大(Frank et al., 2007; Shibata et al., 2010)，在加上本研究使用之 DOC+DPF 對 < 200 nm 各粒徑之微粒呈齊頭式減量，因此對微粒粒徑分布無差異；但 DOC+DPF 於 200 和 600 nm 過濾效率較差，且數量減量將使凝核波微粒膠結減少，因而以小粒徑微粒被排出；值得注意的是，小粒徑微粒對人體健康之危害較大微粒來得嚴重，故此為值得深入探討之問題。

#### 4.4.3 美國暫態循環逐秒微粒數量排放係數

由圖 3-5 美國暫態循環測試曲線中可看出，引擎每秒速度與扭力有相當程度變化，為了解每秒之操作條件對尾氣中微粒之影響，本研究於使用 B10 油品時單獨使用凝結合計數計(CPC)進行逐秒數量濃度之量測，在此 CPC 之量測粒徑為總微粒(非 10-1000 nm)。美國暫態循環逐秒運轉型態與使用 B10 生質柴油所排放之數量排放係數結果如圖 4-33，(a)與(b)分別為美國暫態循環逐秒之速度(speed)與扭力(torque)百分比，(c)圖為使用 B10 油品下逐秒總數量濃度排放係數，由圖中看出兩次運轉測試結果

除了濃度上平均有 1.8 倍差異外，兩次測試隨著時間所排放之微粒數量排放係數趨勢一致，其可表示採樣系統之穩定；再者，暫態循環 0-300 秒與 900-1200 秒之引擎操作條件相同，可看出微粒數量排放也具有相當程度一致性，也代表數據之信度。圖中看出大概從 400 秒開始，有較多微粒數量排放，而在 600 秒開始到 900 秒間，微粒數量達到最多。將其對照 US FTP 運轉條件來看，發現在 400 秒時，為 LANF 之經常性走走停停行車時，平均微粒排放達  $8.26 \times 10^{14}$  #/bhp-hr；而在 600-900 秒時，LAFY 高轉速與扭力行駛條件下，平均微粒排放達  $2.06 \times 10^{15}$  #/bhp-hr，由此發現，高轉速與扭力行駛下會有大量微粒數量產生。

進一步將逐秒數量排放係數與 US FTP 逐秒操作參數作 Pearson 相關係數分析，結果如圖 4-34 美國暫態循環逐運轉型態與所排放之微粒數量排放係數相關係數分布，由圖(a)中可發現速度與排放係數相關係數為 0.69，顯示數量排放係數與引擎轉速有高度相關。圖(b)為扭力與排放係數關係數為 0.47，發現數量排放係數與扭力有中度相關。由此推測引擎尾氣中微粒數量排放與速度和扭力有相關，但速度影響較多。將此兩變項(速度與扭力)與數量排放係數取自然對數作迴歸，結果如表 4-7，方程式如下：

$$\log(y) = 0.011X_1 + 0.001X_2 + 14.17, R^2 = 0.79;$$

其中，y 為引擎所排放之數量排放係數(#/bhp-hr)， $X_1$  為引擎速度百分比，



$X_2$  為引擎扭力百分比。將其以接近惰轉之操作條件(速度 30%、扭力 0%) 帶入方程式中，得到數量排放係數為  $3.11 \times 10^{14}$  #/bhp-hr。在此情況下，增加 1 單位速度，排放係數即增加為  $3.19 \times 10^{14}$  #/bhp-hr；若在加入 1 單位扭力，排放係數則增加為  $3.20 \times 10^{14}$  #/bhp-hr。由此也可看出速度對於引擎尾氣中數量排放係數相對影響較大，與上訴相關性結果相呼應。另外值得注意為，惰轉情況下，引擎即具有相當之排放，顯示引擎只要啟動即具有一定量背景排放，因此政府目前推行情速熄火對於污染物排放上，有相當程度之改善。





表 4-1 樣本加熱與否對微粒數量濃度之影響

Load	0%	50%
heating(300 °C)	number concentration (10 <sup>7</sup> #/cm <sup>3</sup> )	
X	9.42	6.53
V	4.09	5.72
RPD (%)	56.6	12.4

\*RPD 以未加熱前為基準計算加熱後相對差異百分比



表 4-2 未裝設尾氣後處理設備在不同條件下負載數量濃度之比較

Engine	B2_run1		B10		B20		B2_run2	
	Number conc.	RPD	Number conc.	RPD	Number conc.	RPD	Number conc.	RPD
Load (%)	(10 <sup>7</sup> #/cm <sup>3</sup> )	%	(10 <sup>7</sup> #/cm <sup>3</sup> )	%	(10 <sup>7</sup> #/cm <sup>3</sup> )	%	(10 <sup>7</sup> #/cm <sup>3</sup> )	%
0	5.12	64	5.50	132	3.44	82	4.09	35
25	3.13	baseline	2.37	baseline	1.89	baseline	3.03	baseline
50	4.97	59	3.92	65	3.27	73	4.65	53
75	-	-	-	-	-	-	4.97	64

表 4-3 裝設尾氣後處理設備在不同條件下負載數量濃度之比較

Engine	B2 w/DOC+DPF		B10 w/DOC+DPF		B20 w/DOC+DPF		B2 w/DPF		B2 w/DOC+DPF <sub>n</sub>	
	Number conc.	RPD	Number conc.	RPD	Number conc.	RPD	Number conc.	RPD	Number conc.	RPD
Load (%)	(10 <sup>4</sup> #/cm <sup>3</sup> )	%	(10 <sup>4</sup> #/cm <sup>3</sup> )	%	(10 <sup>4</sup> #/cm <sup>3</sup> )	%	(10 <sup>4</sup> #/cm <sup>3</sup> )	%	(10 <sup>4</sup> #/cm <sup>3</sup> )	%
0	6.06	178	4.45	463	5.52	613	1.03	69	68.54	447
25	2.18	baseline	0.79	baseline	0.77	baseline	0.61	baseline	12.53	baseline
50	3.33	53	1.47	85	2.03	162	1.82	199	5.69	-55
75	-	-	-	-	-	-	5.66	829	11.42	-9
100	-	-	-	-	-	-	22.25	3553	42.64	240

表 4-4 不同比例生質柴油在不同負載下氧化觸媒濾煙器裝設與否微粒數量濃度

load (%)	B2_S50		B10		B20	
	raw exhaust ( $10^7 \text{ \#/cm}^3$ )	w/DOC+DPF ( $10^4 \text{ \#/cm}^3$ )	raw exhaust ( $10^7 \text{ \#/cm}^3$ )	w/DOC+DPF ( $10^4 \text{ \#/cm}^3$ )	raw exhaust ( $10^7 \text{ \#/cm}^3$ )	w/DOC+DPF ( $10^4 \text{ \#/cm}^3$ )
0	5.12	6.06	5.50	4.45	3.44	5.52
25	3.13	2.18	2.37	0.79	1.89	0.77
50	4.97	3.33	3.92	1.47	3.27	2.03

表 4-5 濾煙器與新氧化觸媒濾煙器之引擎排放微粒數量濃度

load (%)	B2		B2	
	raw exhaust ( $10^7 \text{ \#/cm}^3$ )	w/DOC ( $10^4 \text{ \#/cm}^3$ )	raw exhaust ( $10^7 \text{ \#/cm}^3$ )	w/DOC+DPF <sub>n</sub> ( $10^4 \text{ \#/cm}^3$ )
0	4.09	1.03	4.55	68.54
25	3.03	0.61	3.41	12.53
50	4.65	1.82	5.72	5.69
75	4.97	5.66	5.51	11.42

表 4-6 穩態測試下不同轉速之次微米微粒數量濃度與係數表( $10^8 \text{ \#/cm}^3$ )

run	idle			Low Load			Medium Load			High Load		
	Number conc.			Number conc.			Number conc.			Number conc.		
	n	Mean	RSD (%)	n	Mean	RSD (%)	n	Mean	RSD (%)	n	Mean	RSD (%)
1	2	5.05	37	5	2.43	16	5	4.88	32	5	11.24	15
2	5	3.48	33	5	3.43	13	5	3.31	43	5	8.49	27
3	5	2.47	34	5	4.61	8	5	5.61	40			
Mean	12	3.67	41	10	2.93	22	15	4.10	31	15	9.86	36
Mean*		11.65			0.61			1.48			2.67	

\*單位為  $10^{15} \text{ \#/bhp-hr}$



表 4-7 美國暫態循環測試下五種測試條件之次微米微粒數量排放係數與濃度總表( $10^{13}$  #/bhp-hr)

Engine start type	B1_S50			B1_S10			B10			B1/DOC			B1/DOC+DPF		
	n	Mean	RSD (%)	n	Mean	RSD (%)	n	Mean	RSD (%)	n	Mean	RSD (%)	n	Mean	RSD (%)
Cold	3	163.8	46	5	356.8	73	5	82.3	59	3	49.3	88	5	0.5	111
Hot*	15	208.8	98	15	126.4	66	5	121.4	96	28	43.5	84	15	0.6	148
Mean**	18	200.5	-	20	159.3	-	10	98.6	-	31	44.3	-	20	0.6	-
Mean** ( $10^{13}$ #/km)		209.2			166.2			96.8			45.9			0.6	
Mean** ( $10^7$ #/cm <sup>3</sup> )		64.8			51.6			51.7			14.4			0.2	

\*Arithmetic mean

\*\*Weighted

mean:Cold:Hot=1:6

表4-8 引擎速度及扭力與數量排放係數迴歸

模式	未標準化係數		標準化係數	t	顯著性
	B 之估計值	標準誤	Beta 分配		
(常數)	14.170	0.010		1,432.46	0.000
Speed	0.011	0.000	0.850	54.29	0.000
Torque	0.001	0.000	0.071	4.51	0.000

依變數：log(Emission Factor)



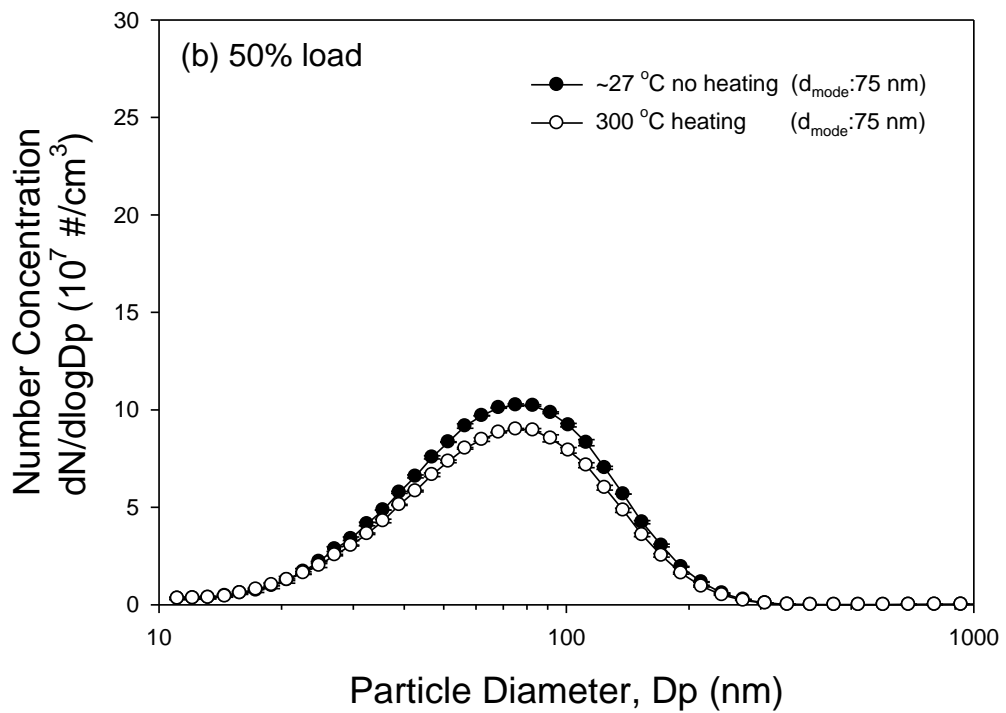
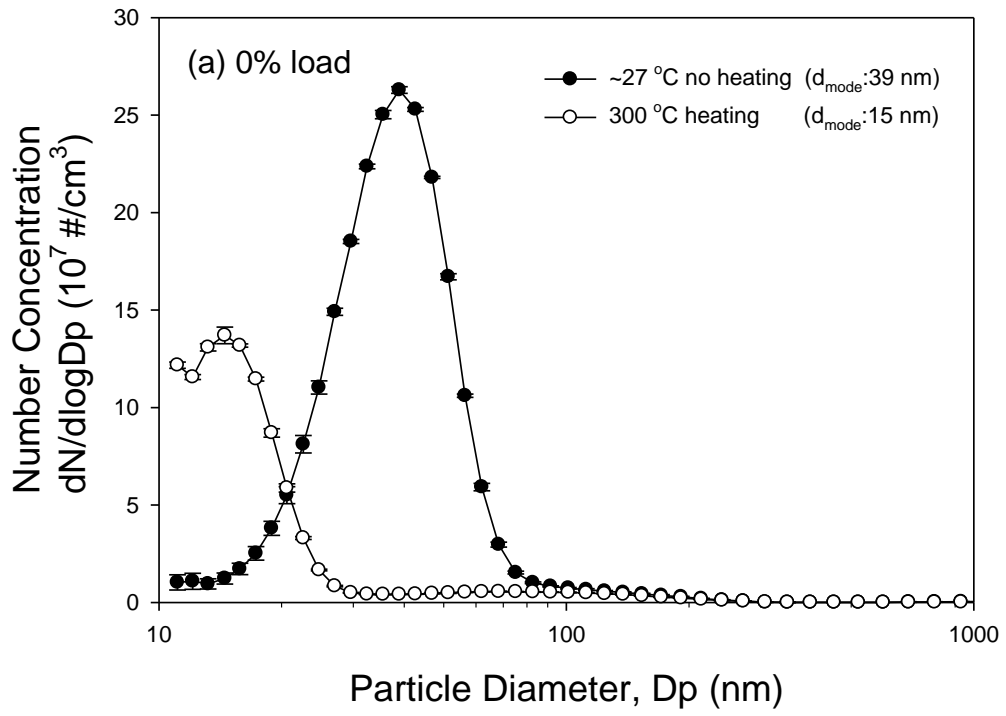


圖 4-1 樣本加熱與否對微粒數量濃度粒徑分布之影響 (a) 0% 負載 (b) 50% 負載

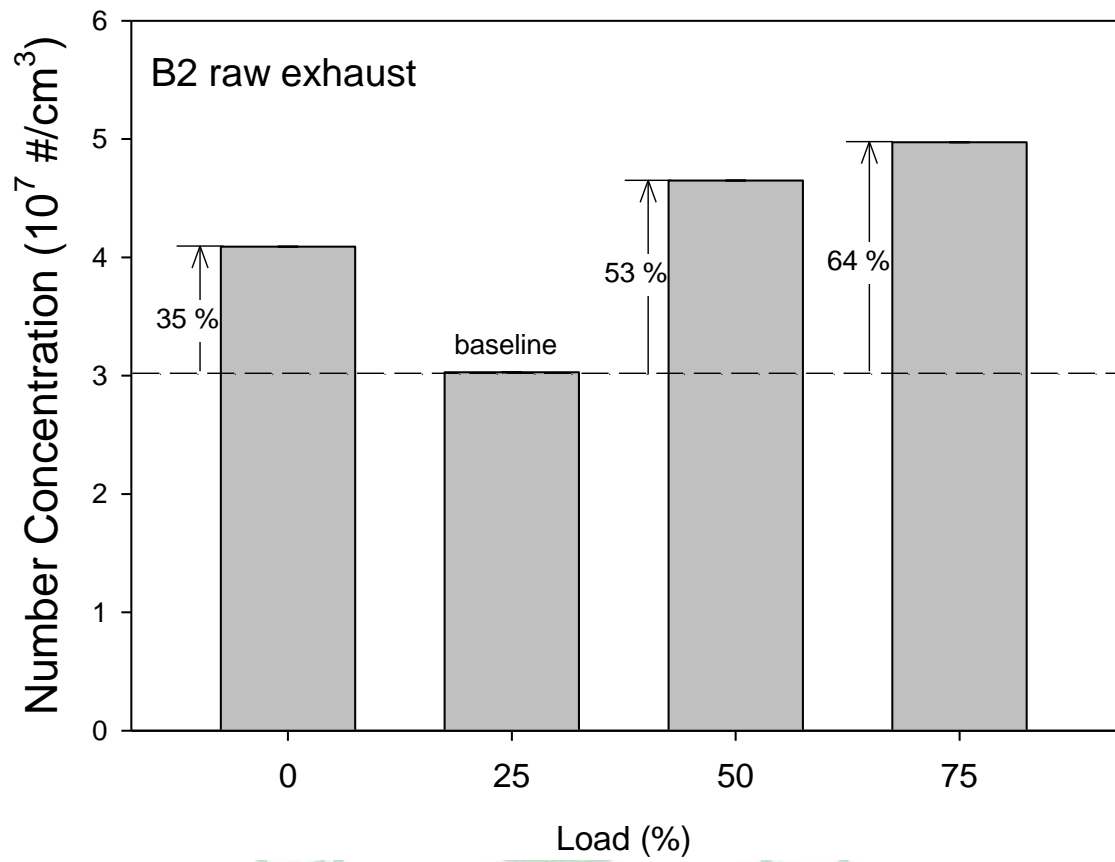


圖 4-2 使用一般市售超級柴油(B2)在不同引擎負載下未裝設尾氣後處理

設備之微粒數量濃度

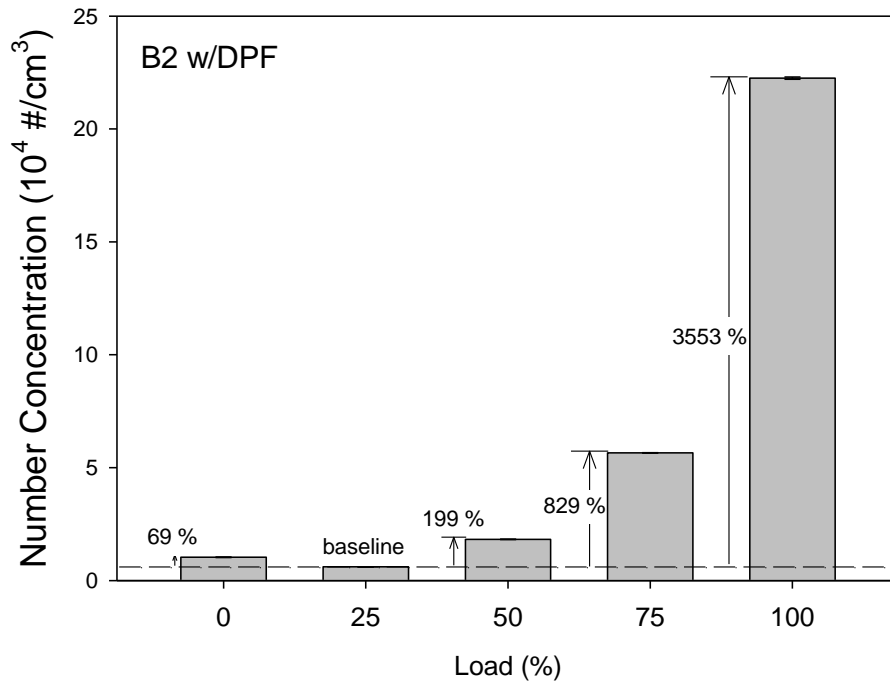


圖 4-3 使用一般市售超級柴油(B2) 在不同引擎負載下裝設濾煙器之微粒數量濃度

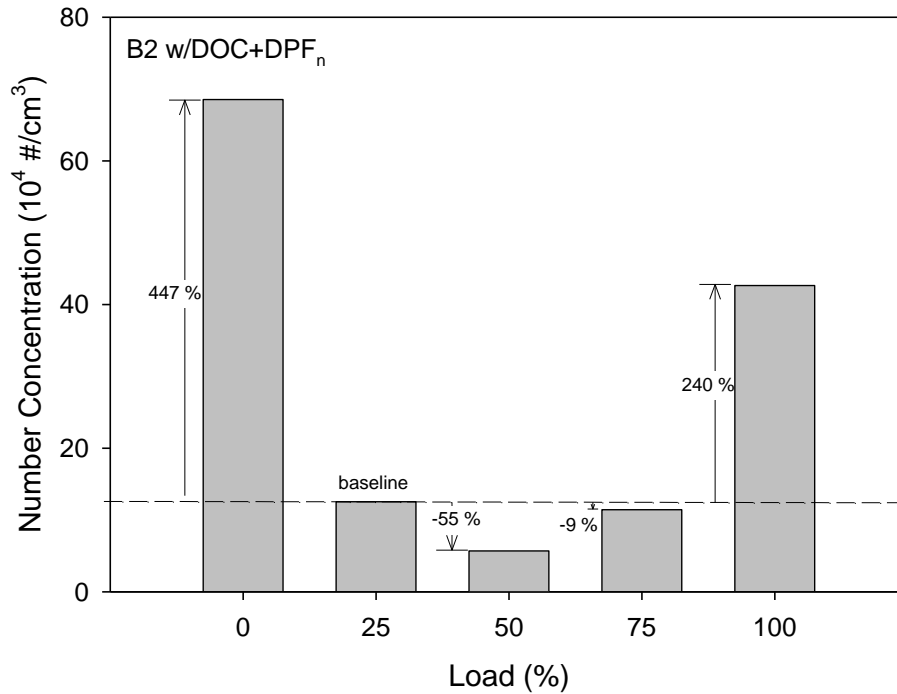
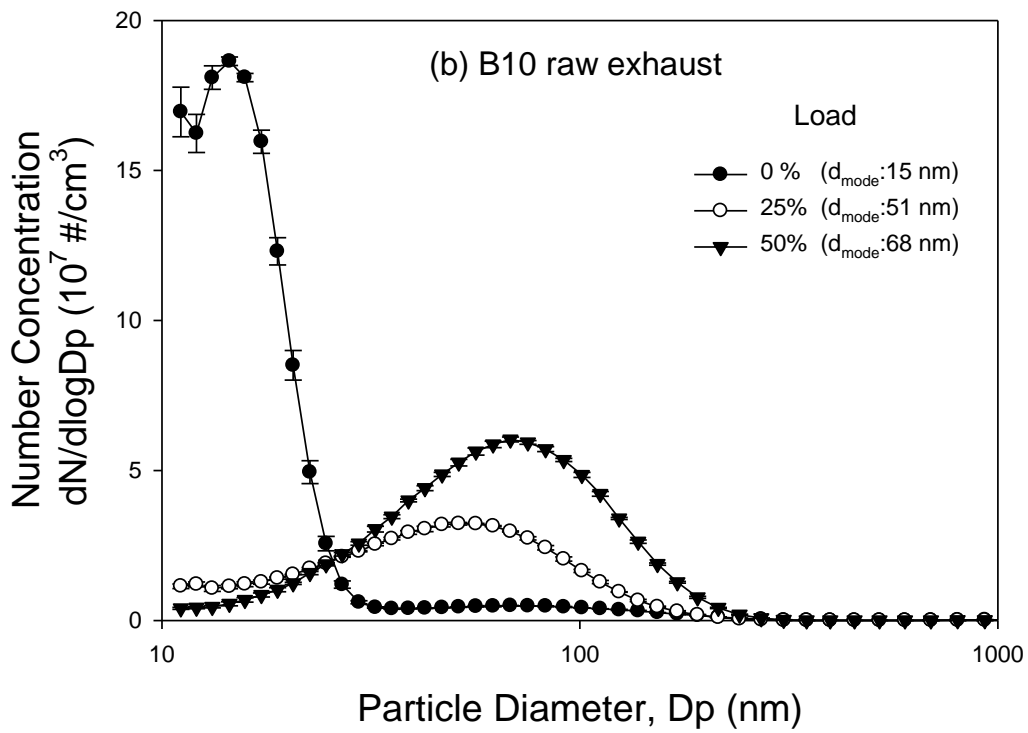
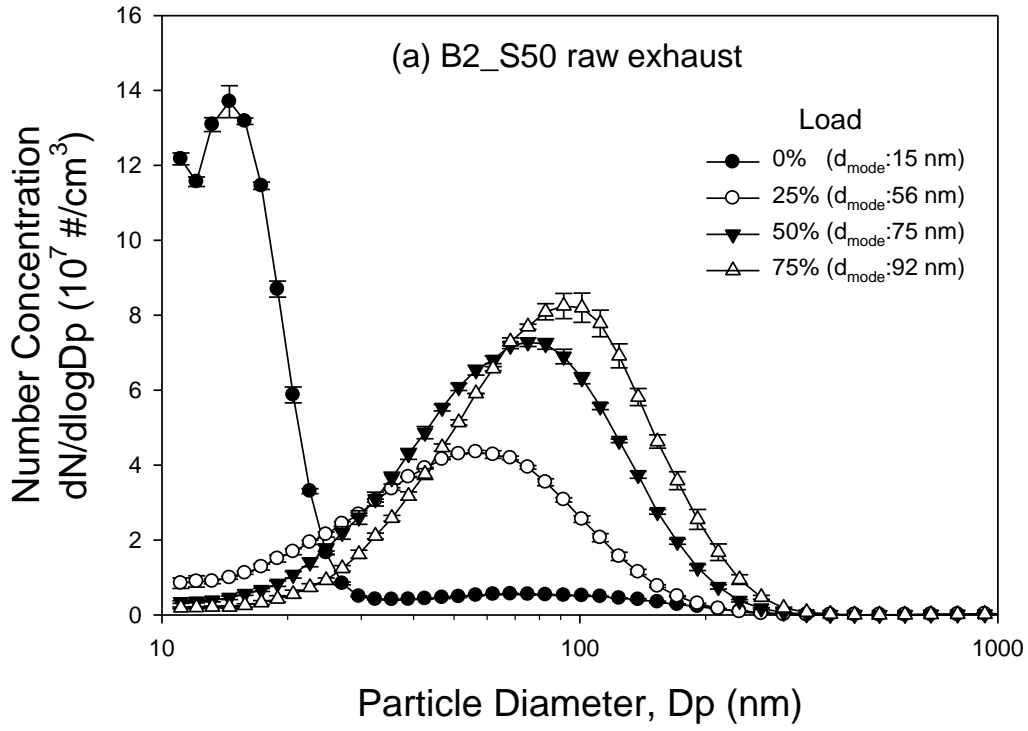


圖 4-4 使用一般市售超級柴油(B2) 在不同引擎負載下裝設新氧化觸媒濾煙器之微粒數量濃度





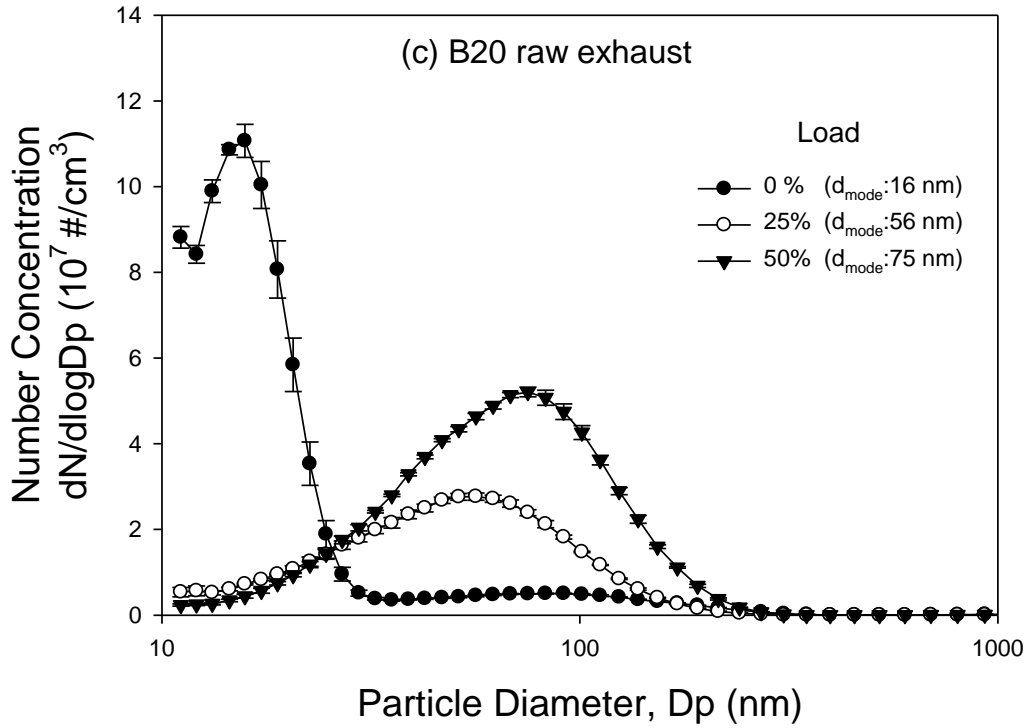
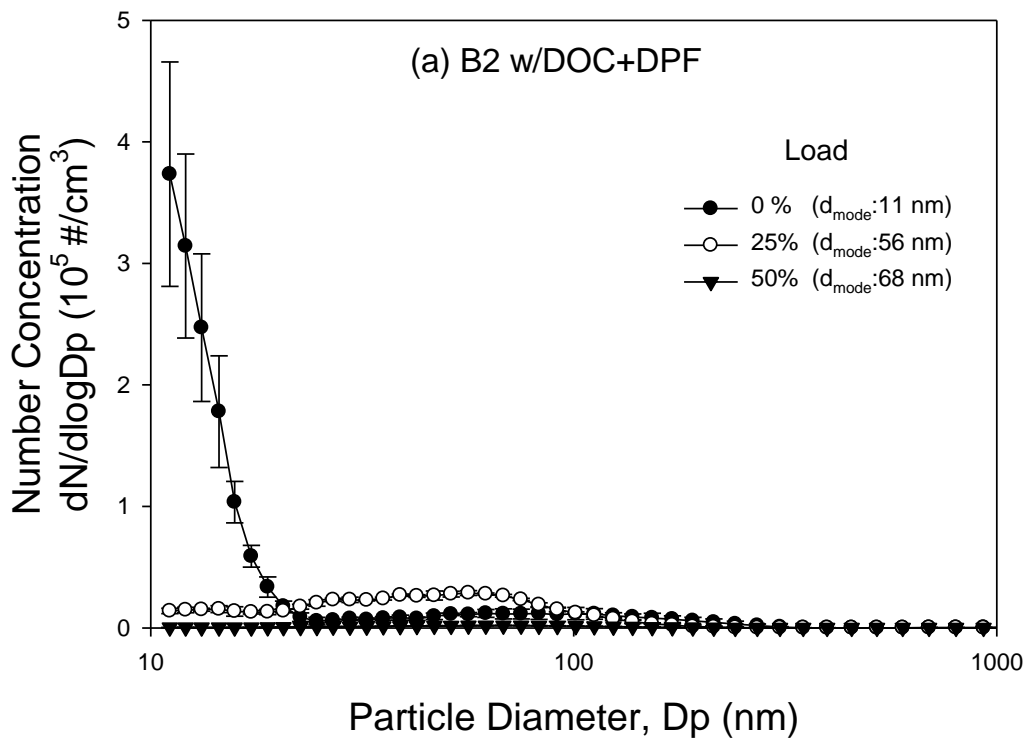


圖 4-5 不同比例生質柴油在不同引擎負載下未裝設尾氣後處理設備之微粒數量濃度粒徑分布 (a)市售 B2 柴油 (b)10% 生質柴油 (c)20% 生質柴油



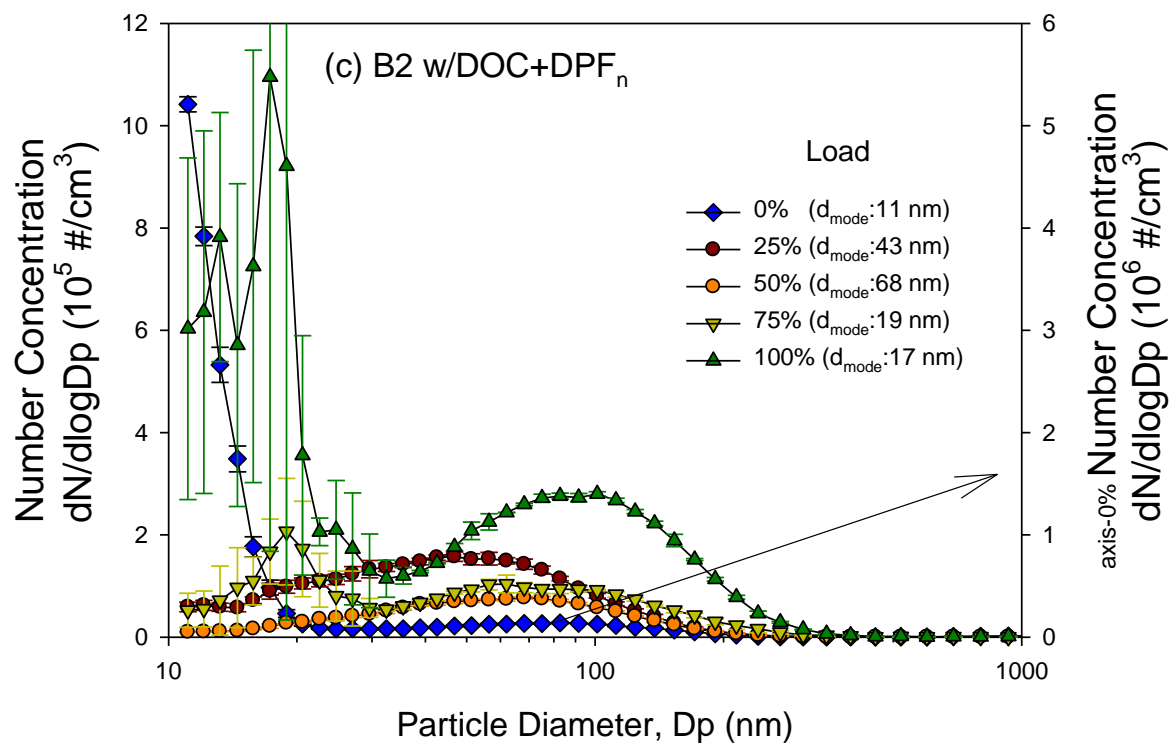
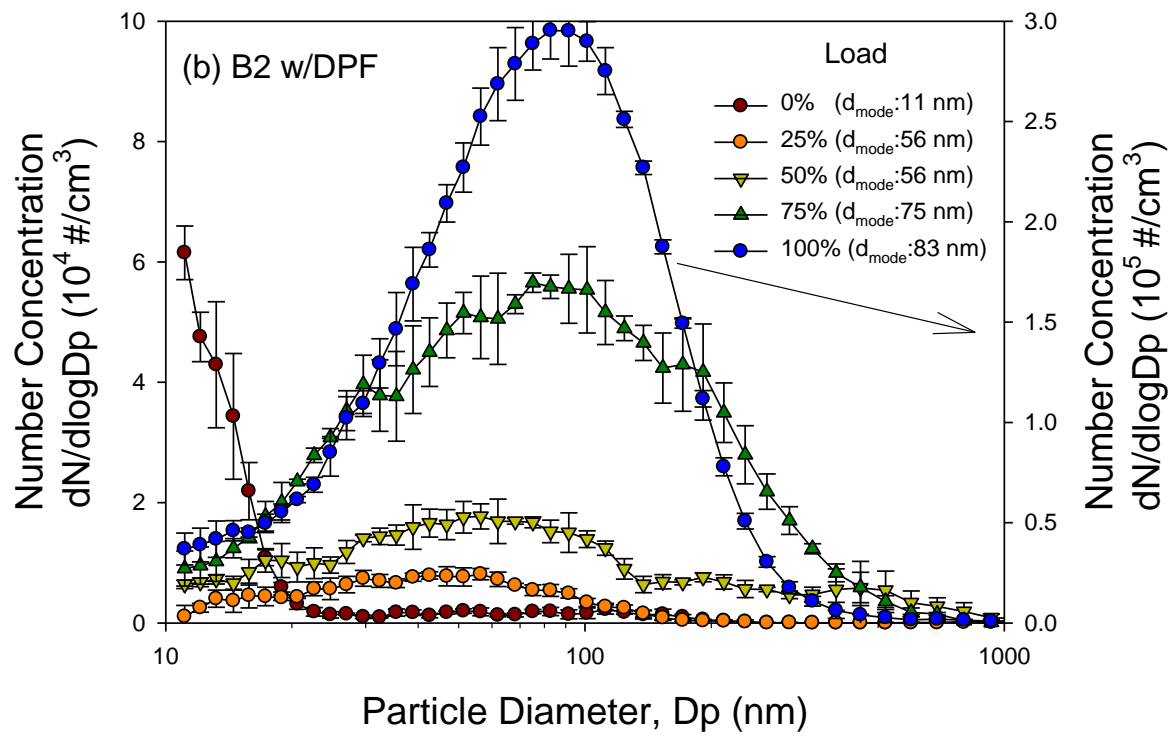


圖 4-6 裝設尾氣後處理設備在不同引擎負載之微粒數量濃度粒徑分布 (a)

氧化觸媒濾煙器 (b)濾煙器 (c)新氧化觸媒濾煙器

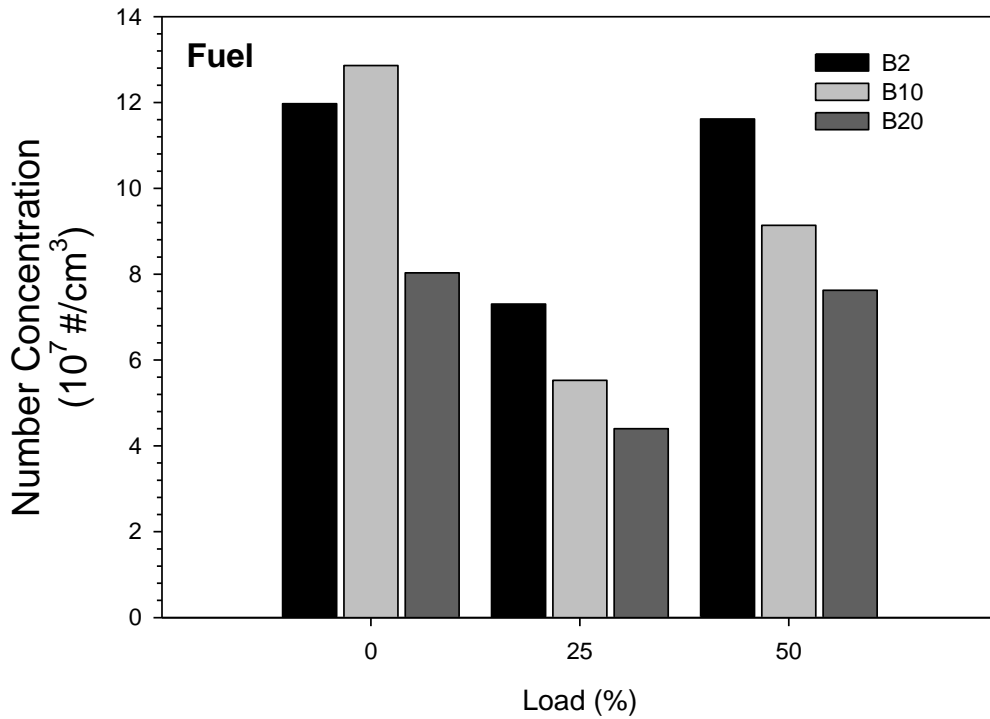


圖 4-7 在相同負載下使用不同比例生質柴油之微粒數量濃度

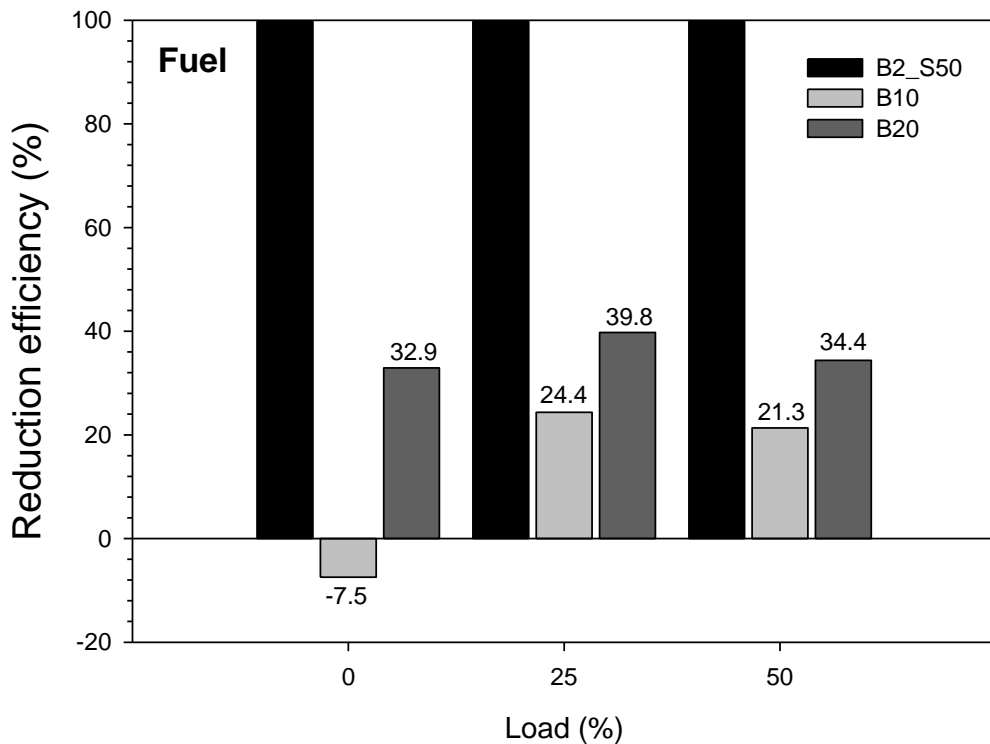


圖 4-8 在相同負載下使用不同比例生質柴油之微粒數量濃度減量效率

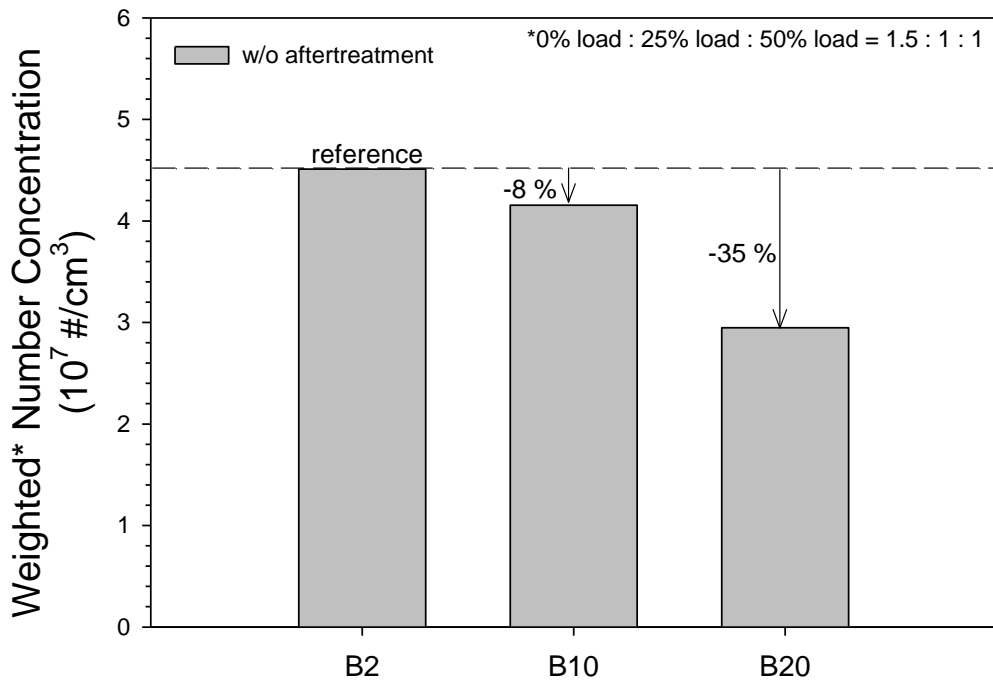
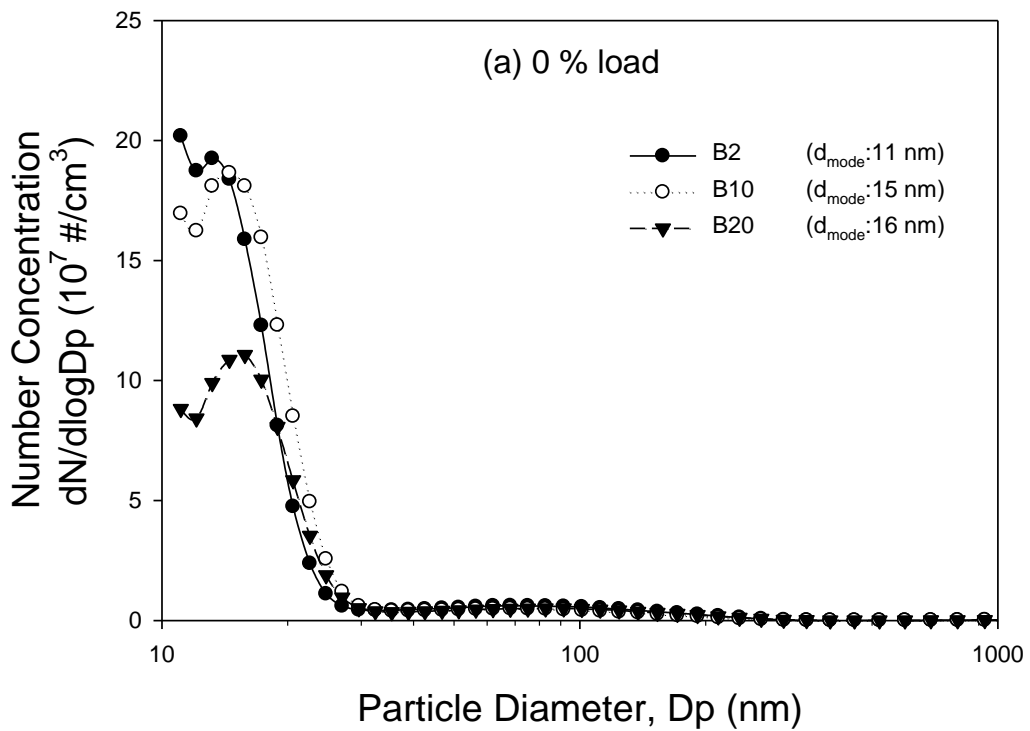


圖 4-9 不同比例生質柴油之微粒加權平均數量濃度





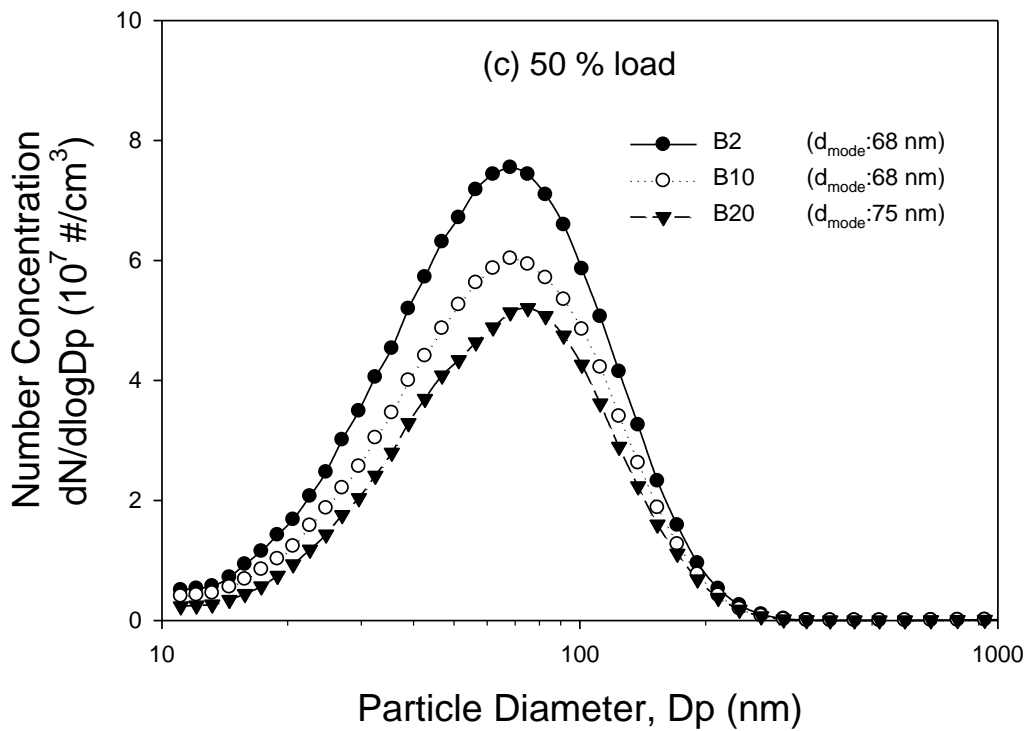
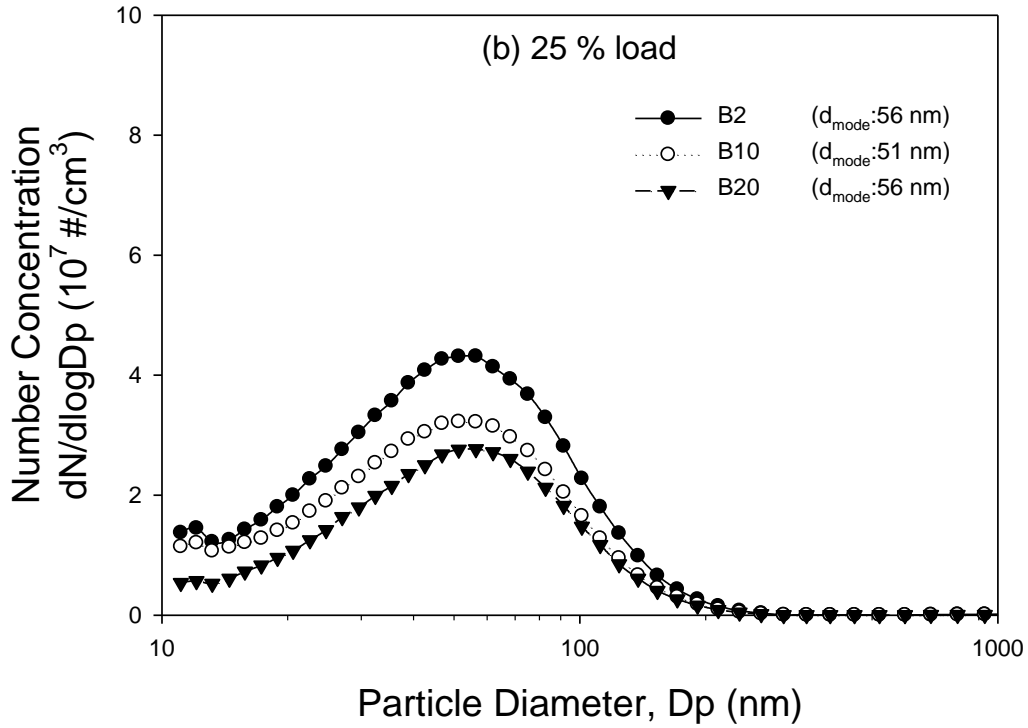


圖 4-10 在相同負載下使用不同比例生質柴油之微粒數量濃度粒徑分布

(a)0% (b)25% (c)50% 負載

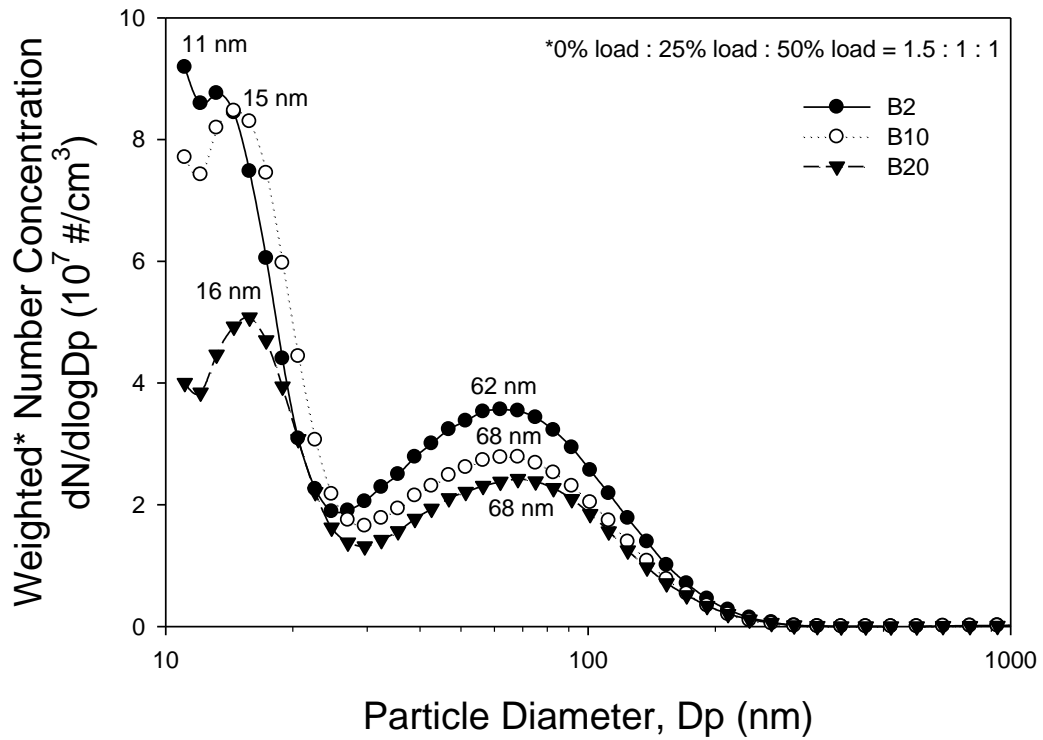


圖 4-11 不同比例生質柴油之微粒加權平均數量濃度粒徑分布

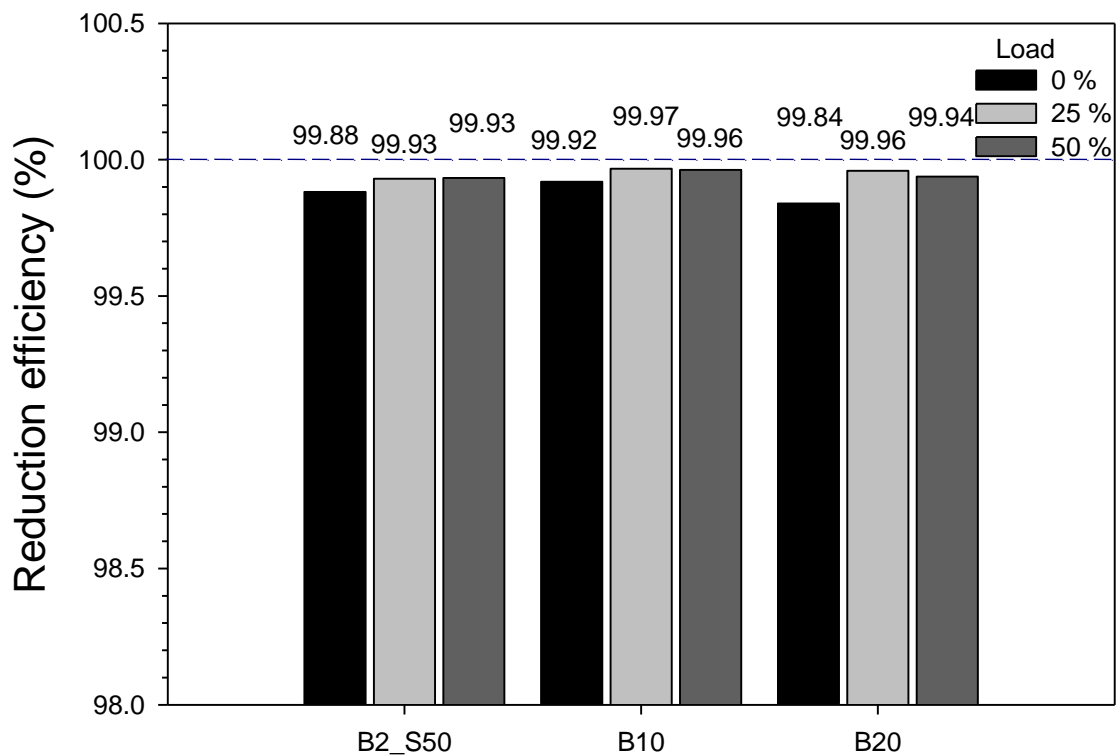


圖 4-12 不同比例生質柴油不同負載下裝設氧化觸媒濾煙器(DOC+DPF)

對引擎尾氣中微粒數量濃度減量效率

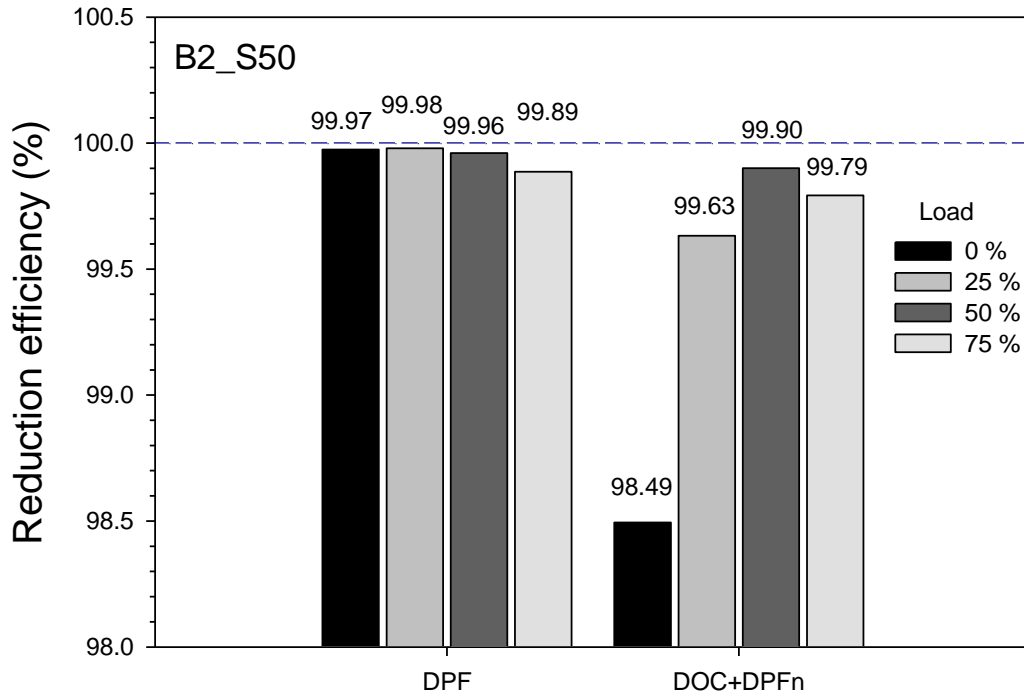


圖 4-13 濾煙器與氧化觸媒濾煙器對引擎尾氣中微粒數量濃度減量效率

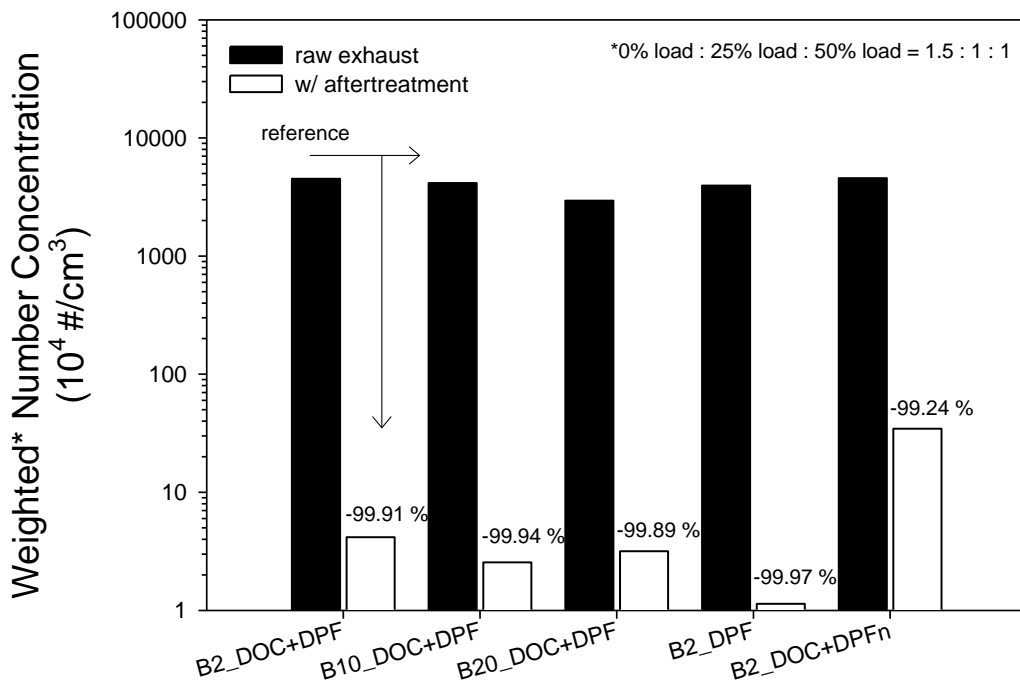


圖 4-14 引擎尾氣微粒數量濃度與裝設尾氣後處理設備之加權平均數量

濃度減量效率

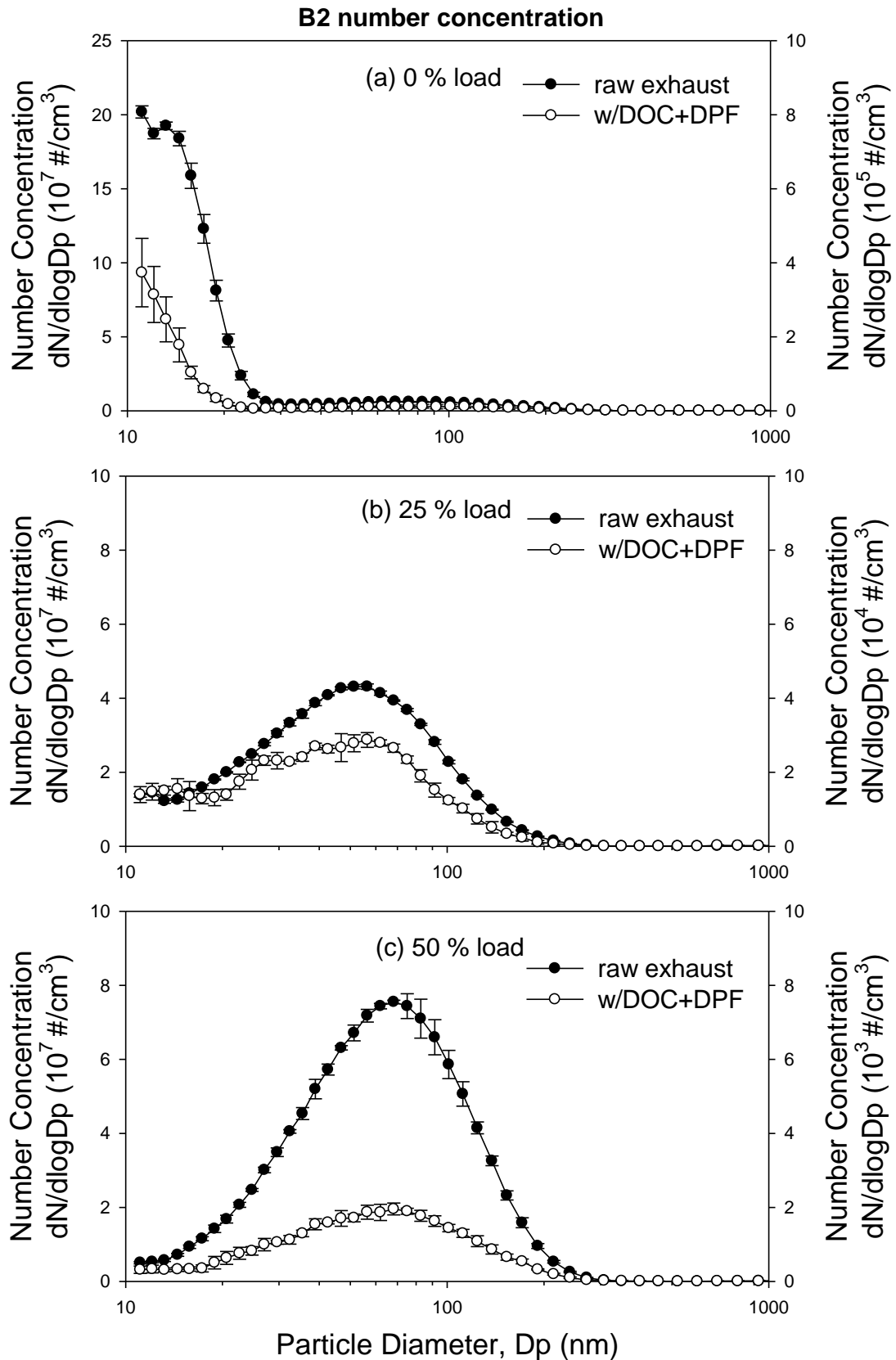


圖 4-15 使用一般市售超級柴油(B2)在不同負載下是否裝設氧化觸媒濾

煙器之微粒數量濃度粒徑分布 (a)0% (b)25% (c)50% 負載

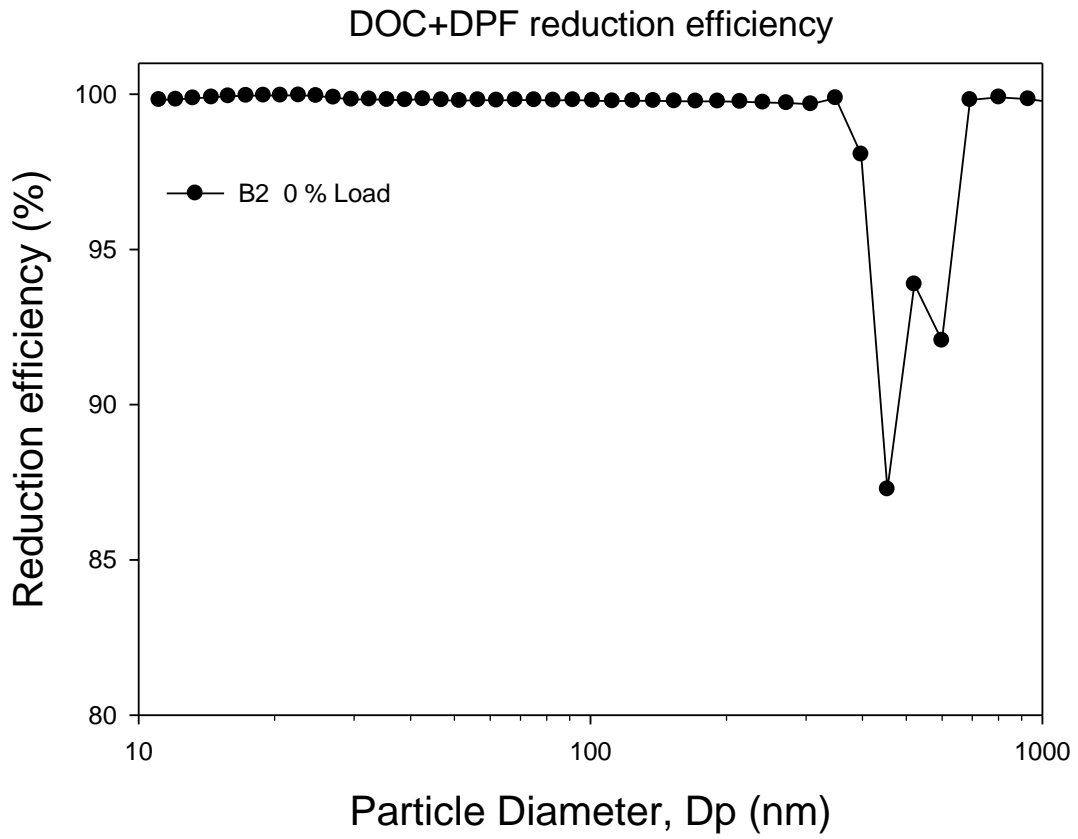


圖 4-16 使用一般市售超級柴油(B2)在 0% 負載操作下尾氣中微粒數量濃度經過 DOC+DPF 之減量效率粒徑分布



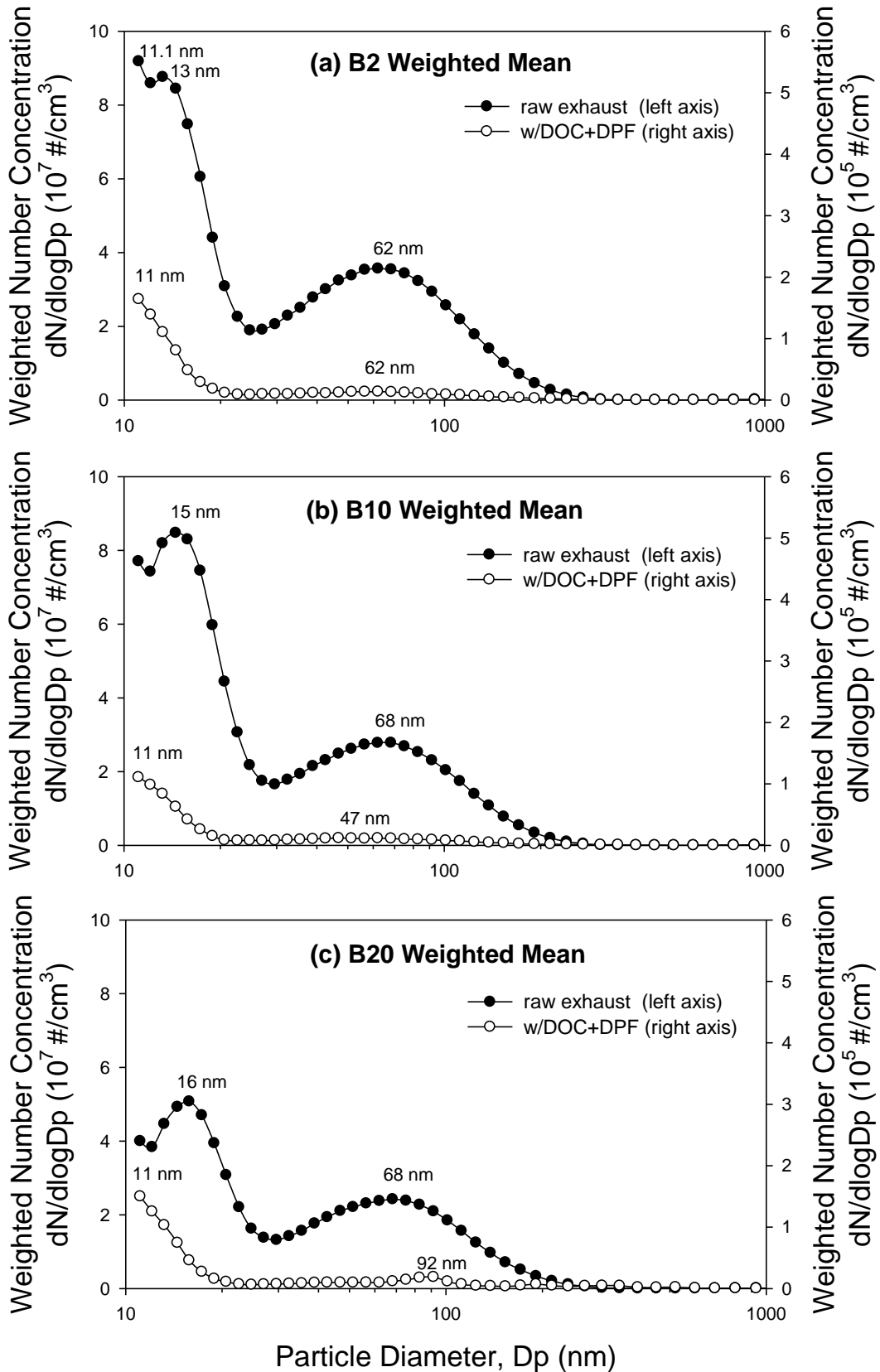
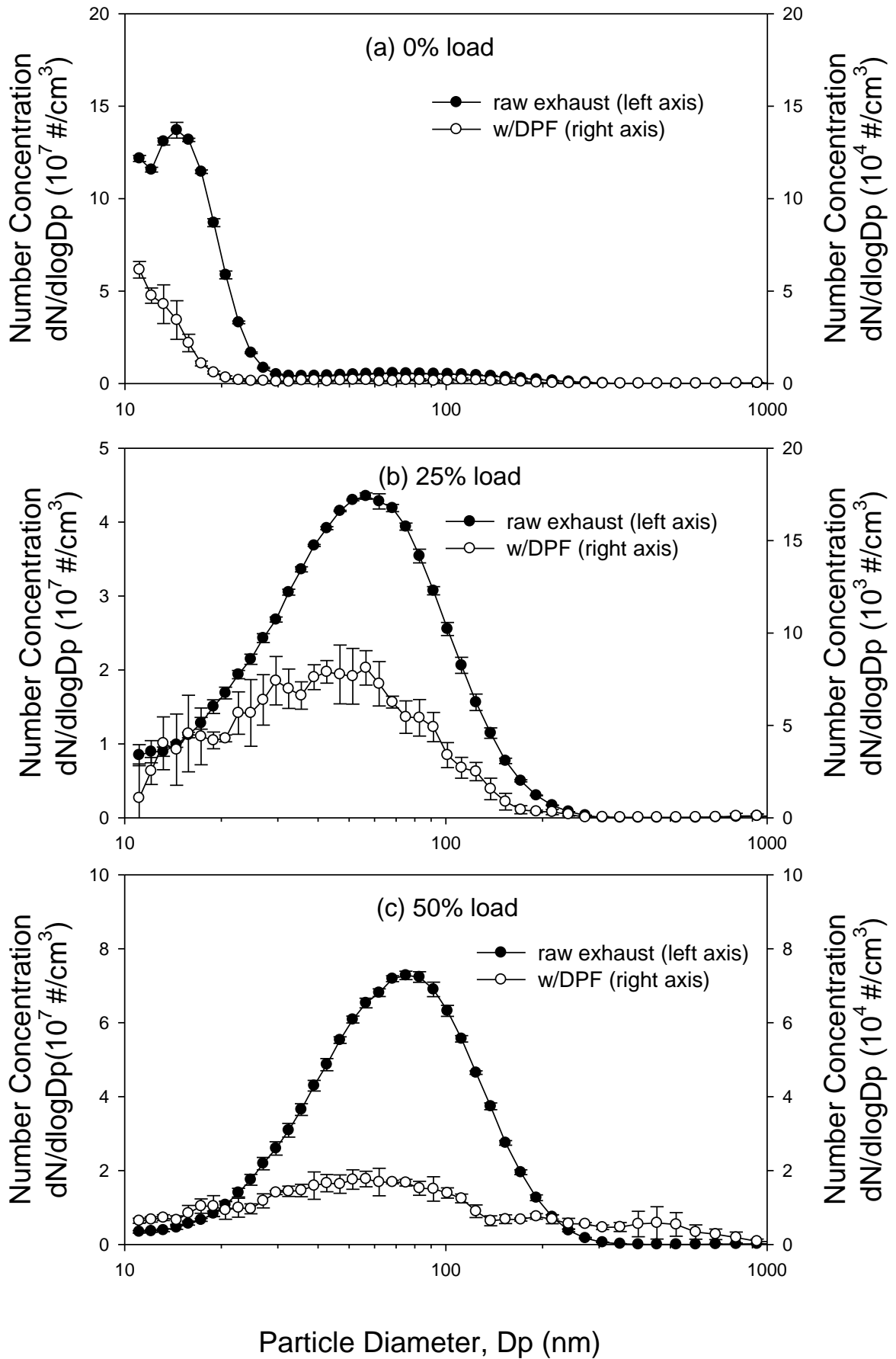


圖 4-17 使用不同比例生質柴油是否裝設氧化觸媒濾煙器之微粒加權數

量濃度粒徑分布 (a)B2\_S50 (b)B10 (c)B20 油品

### B2 number concentration



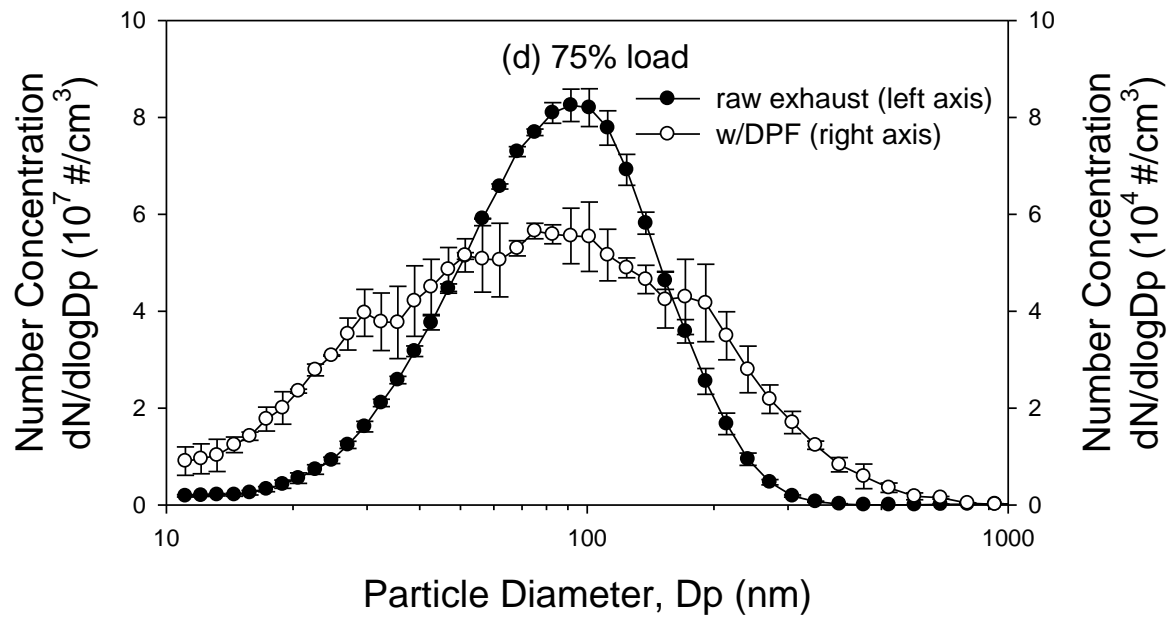
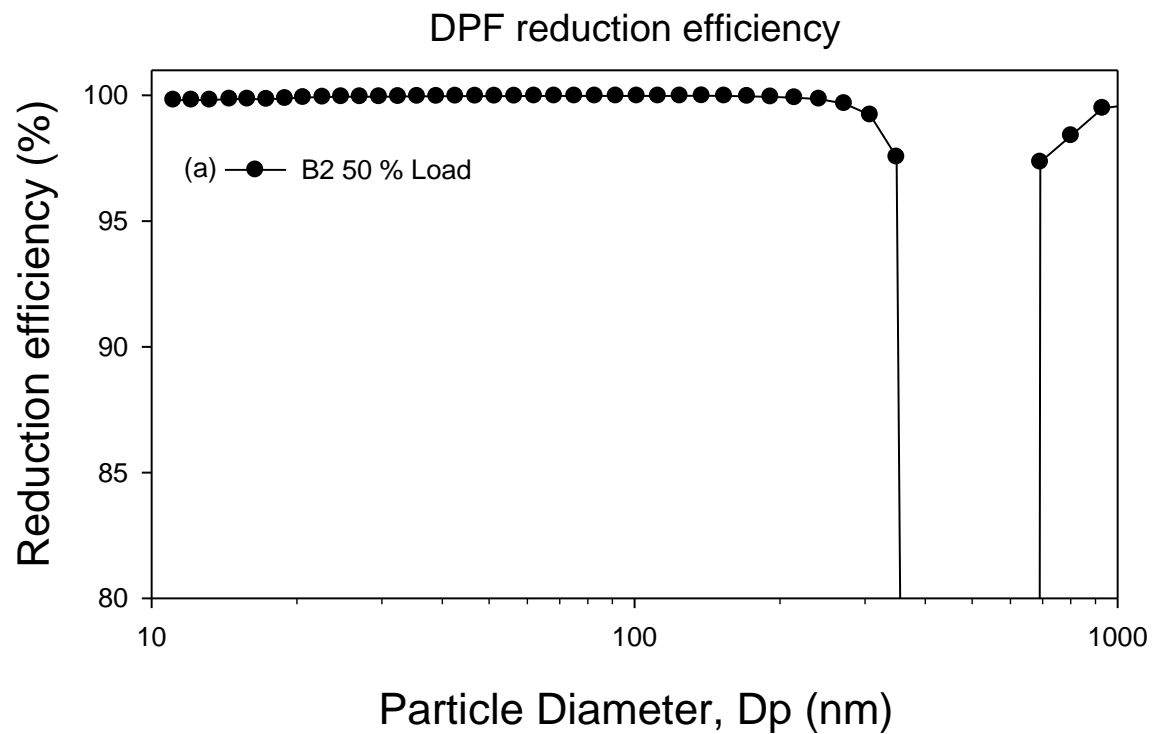


圖 4-18 使用一般市售超級柴油(B2)在不同負載下是否裝設濾煙器之微粒

數量濃度粒徑分布 (a)0% (b)25% (c)50% (d)75% 負載



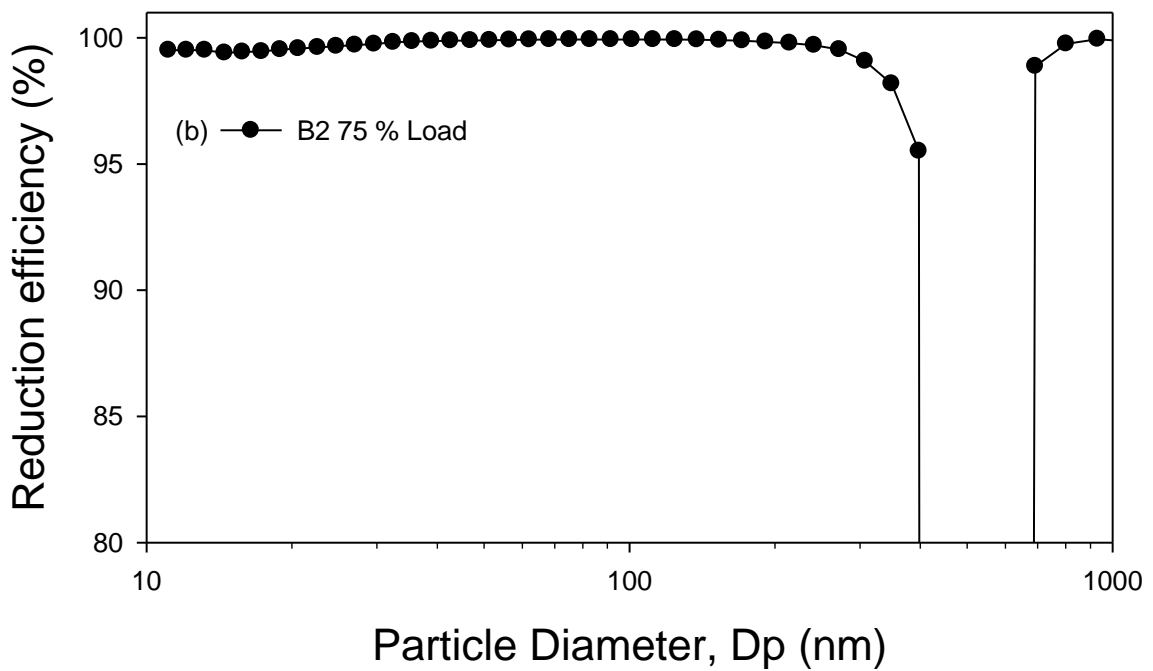


圖 4-19 使用一般市售超級柴油(B2)在不同負載操作下尾氣中微粒數量濃度裝設 DPF 之減量效率粒徑分布 (a)50 (b)75%負載

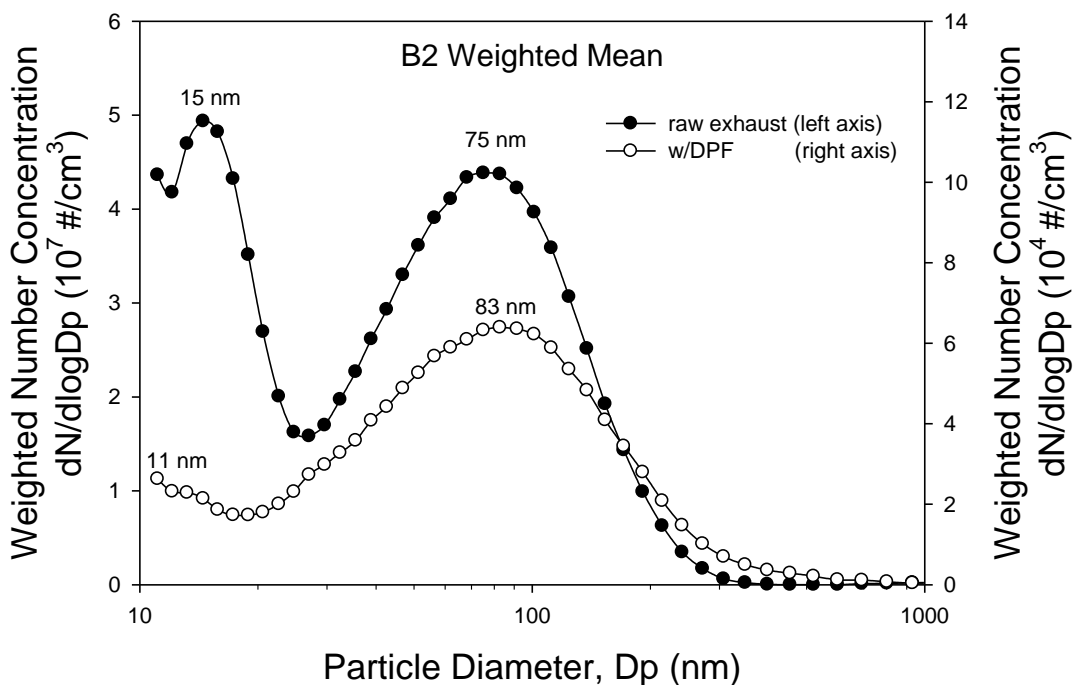
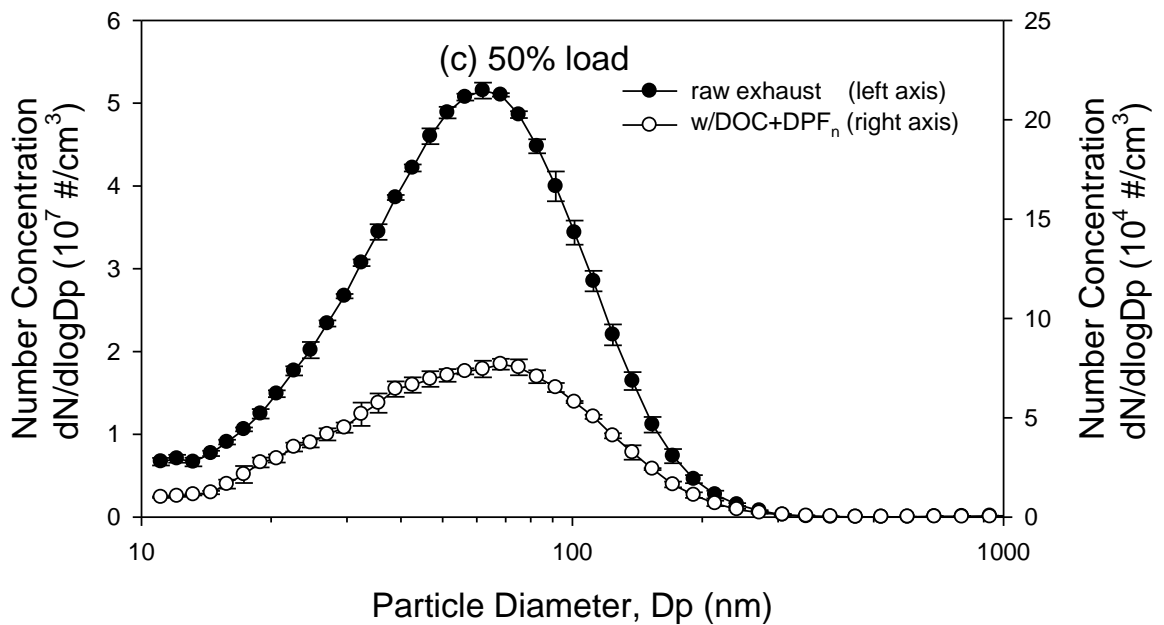
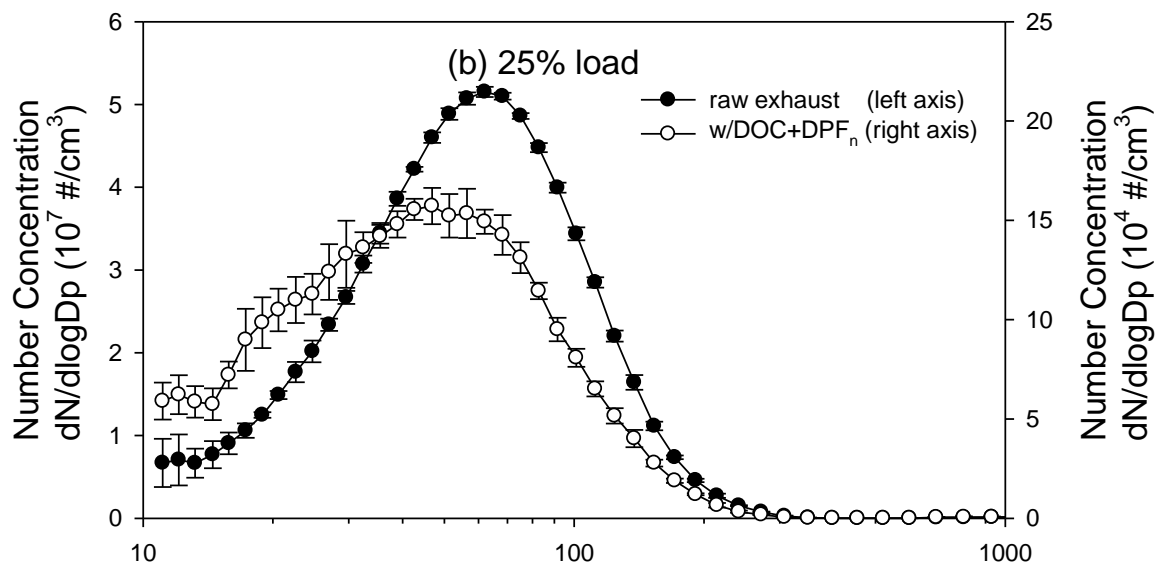
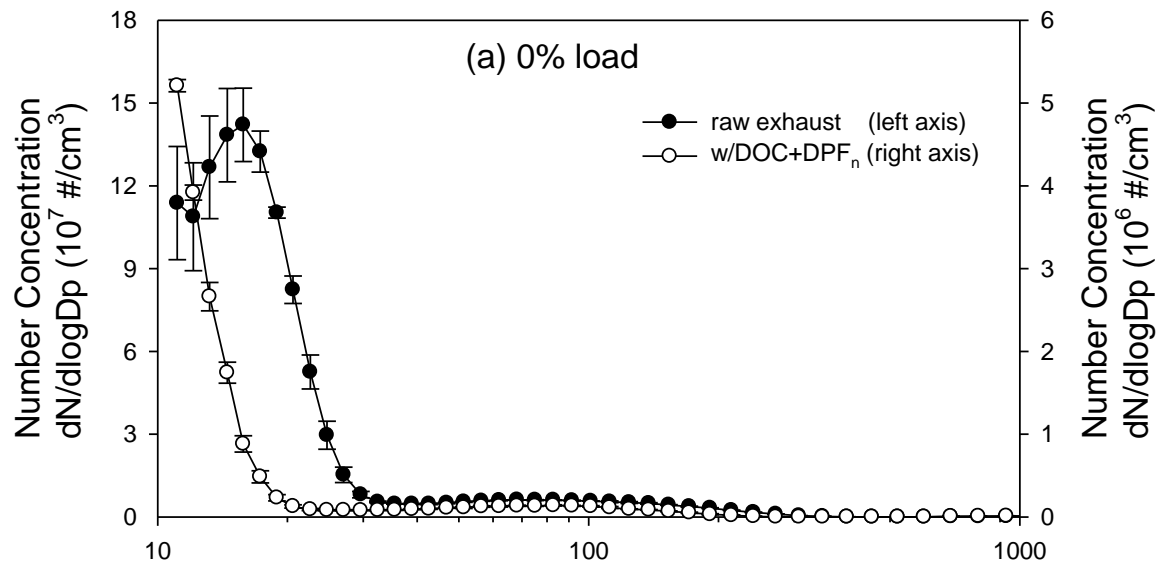


圖 4-20 使用一般市售超級柴油(B2)裝設濾煙器與否之微粒加權數量濃度粒徑分布





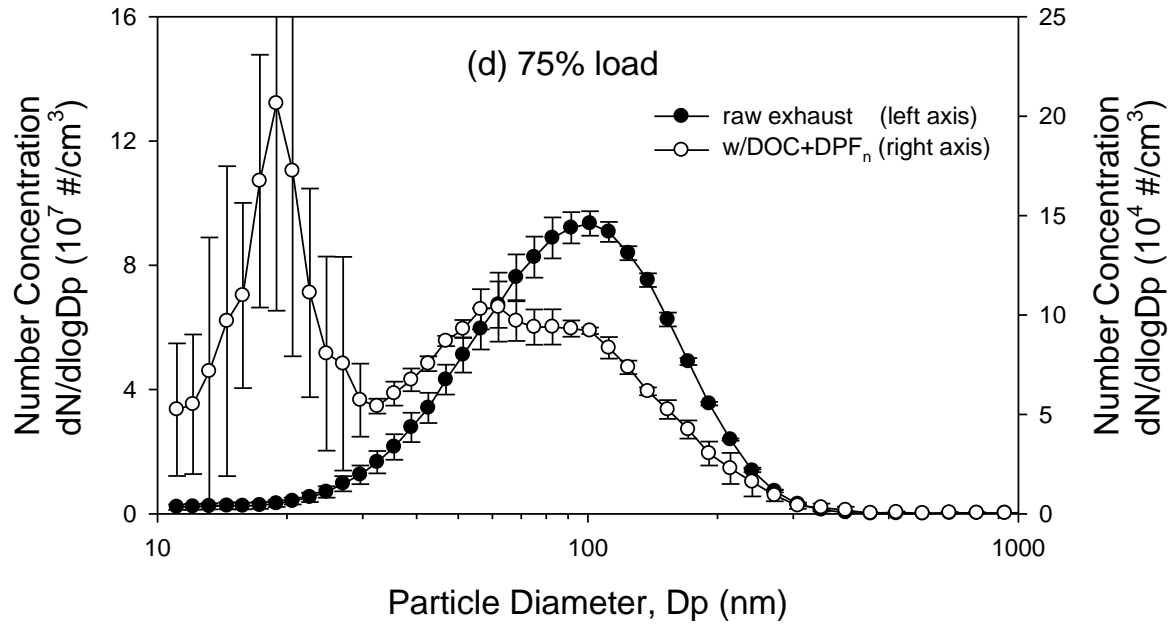


圖 4-21 使用一般市售超級柴油(B2)在不同負載下是否裝設新氧化觸媒濾

煙器之微粒數量濃度粒徑分布 (a)0% (b)25% (c)50% (d)75% 負載

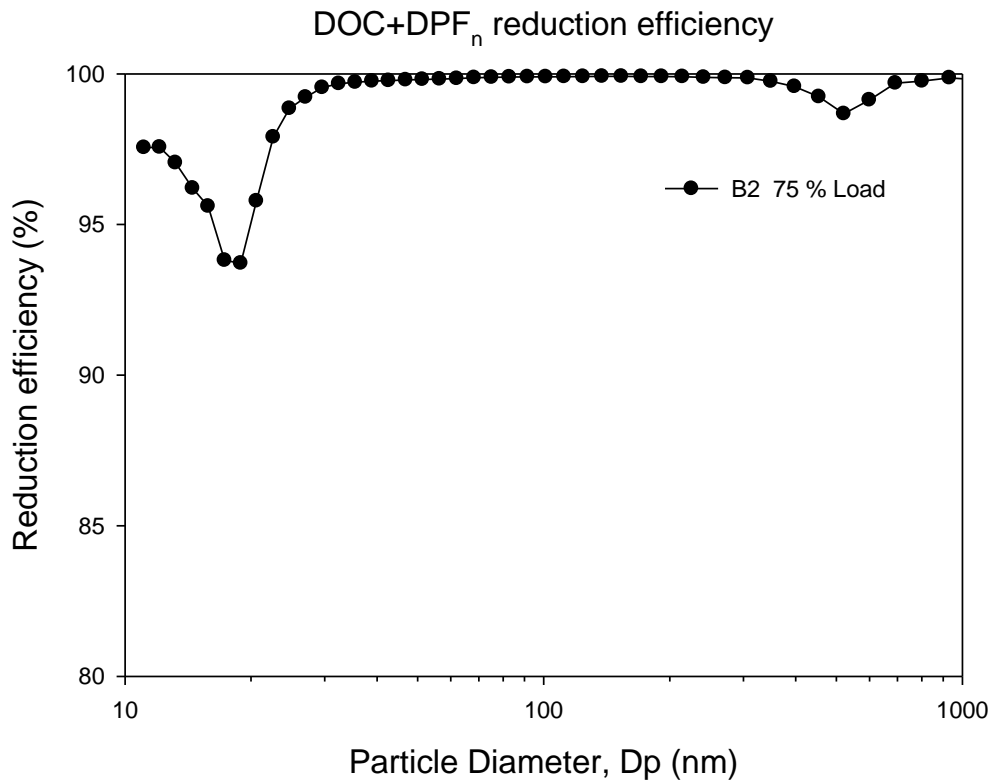


圖 4-22 一般市售超級柴油(B2)在 75%負載操作下尾氣中微粒數量濃度

裝設 DOC+DPF<sub>n</sub> 之減量效率粒徑分布

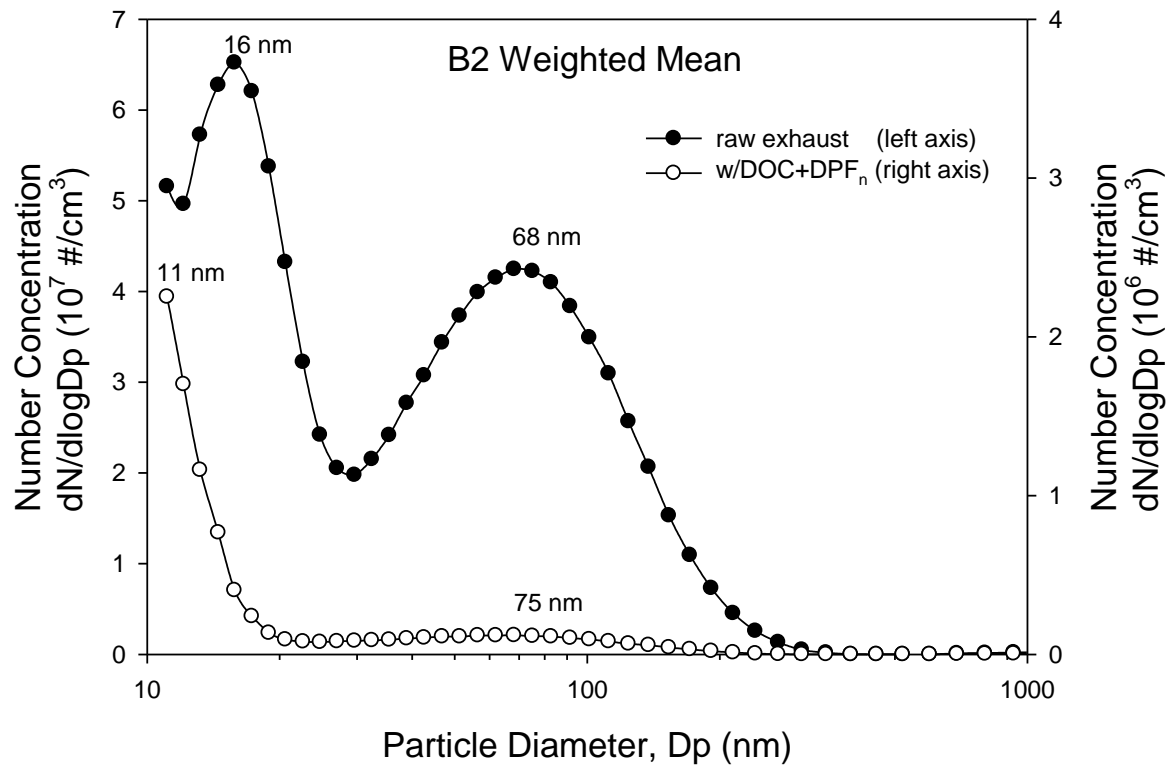


圖 4-23 裝設新氧化觸媒濾煙器與否之微粒加權數量濃度粒徑分布



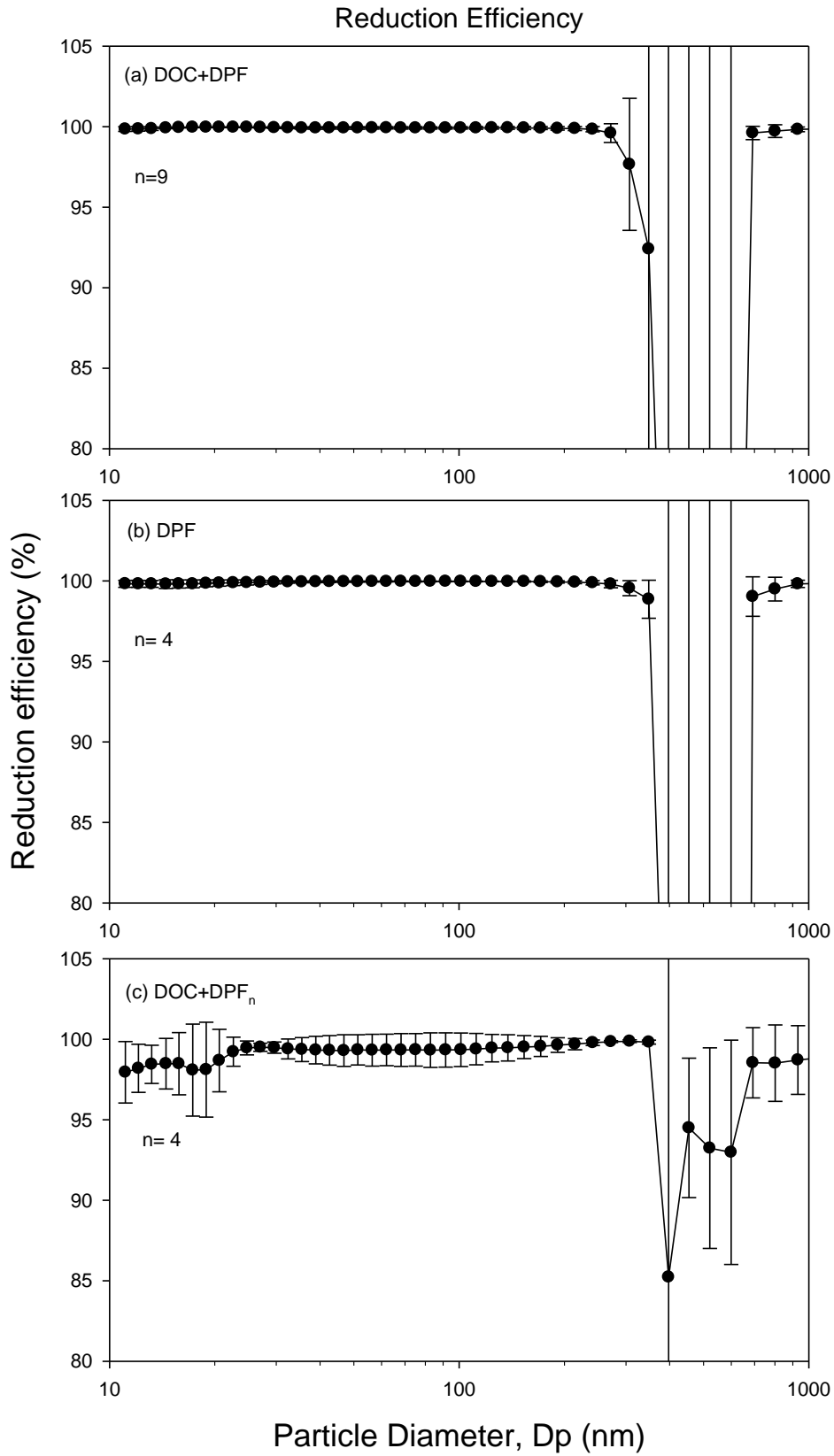


圖 4-24 尾氣後處理設備不同粒徑減量效率 (a)DOC+DPF (b)DPF

(c)DOC+DPF<sub>n</sub>

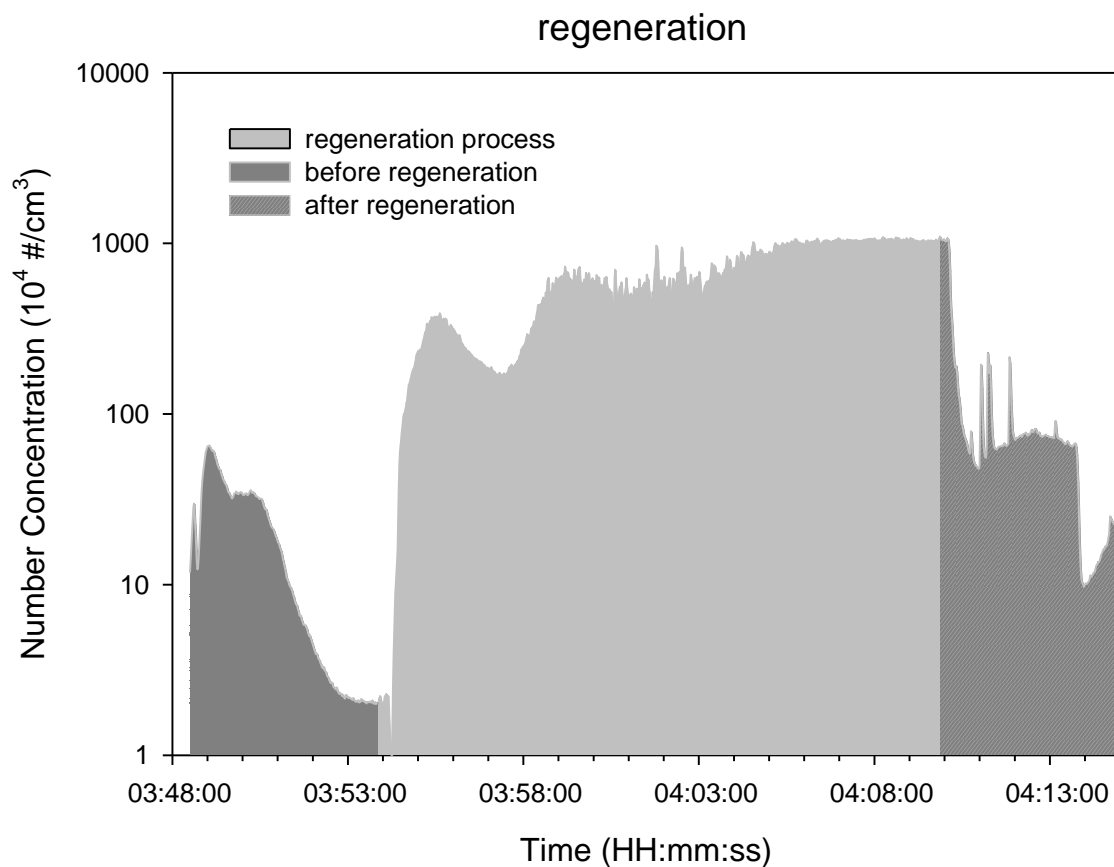


圖 4-25 DOC+DPF 再生過程逐秒微粒數量濃度排放

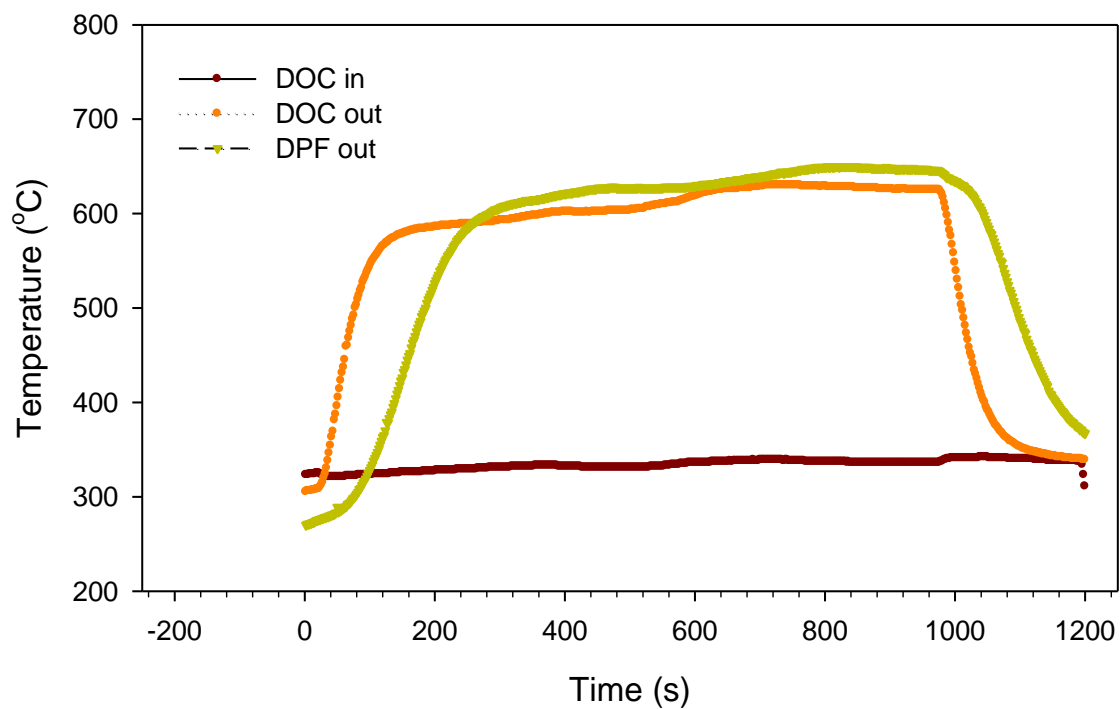


圖 4-26 DOC+DPF 再生過程中逐秒排氣溫度變化

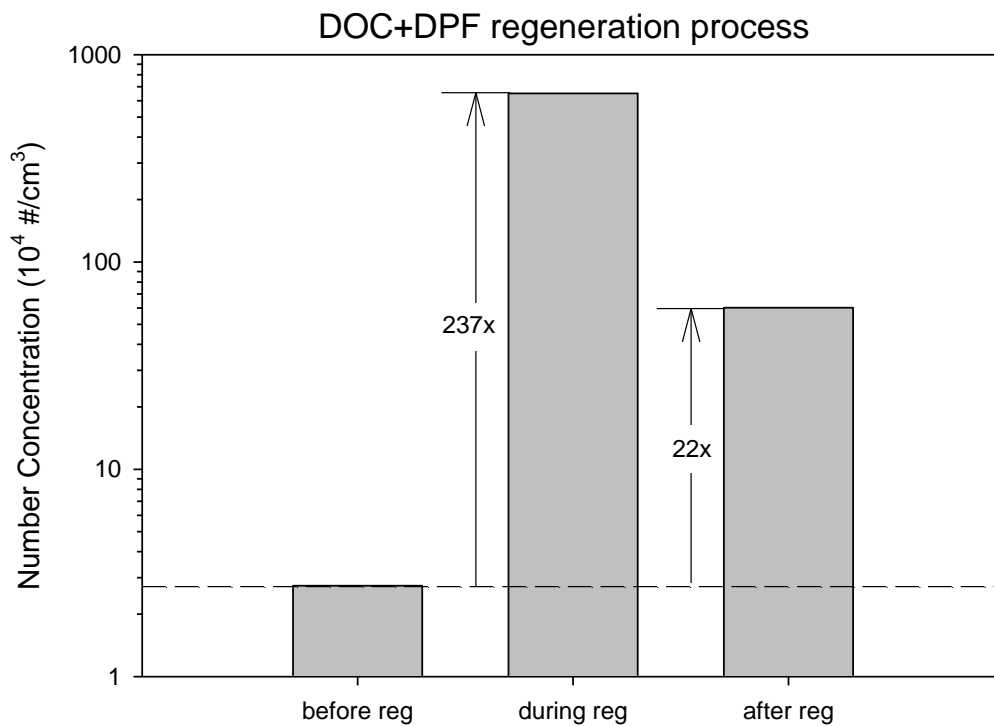


圖 4-27 DOC+DPF 再生前、中及後之微粒數量濃度

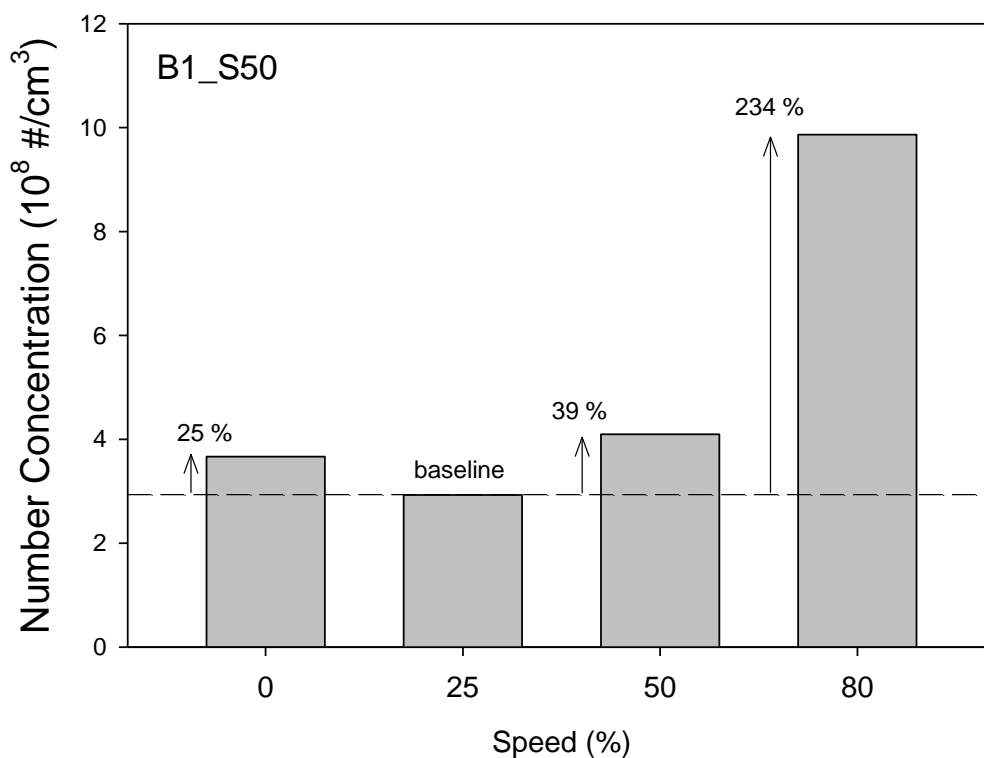


圖 4-28 定容積稀釋系統中不同轉速穩態測試下次微米微粒數量濃度



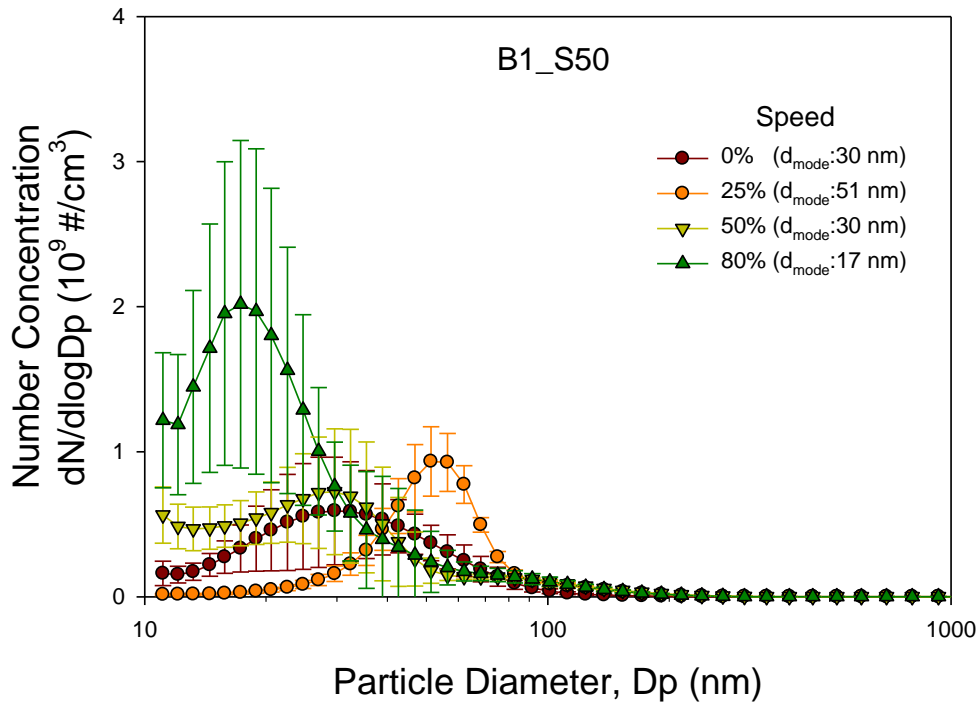


圖 4-29 定容積稀釋系統中不同轉速穩態測試下之次微米微粒數量濃度



粒徑分布

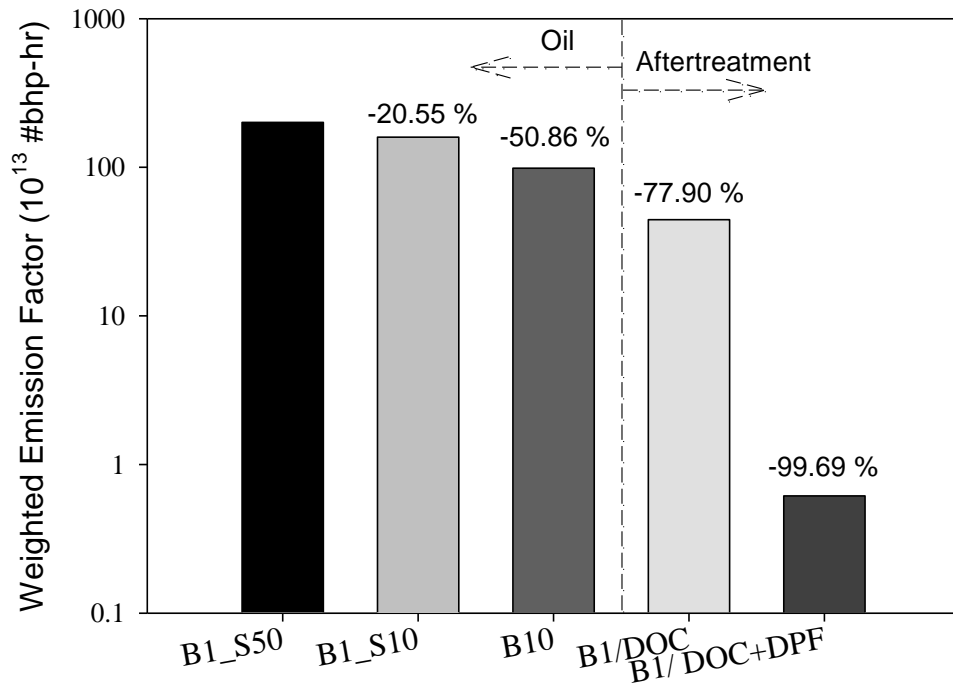


圖 4-30 暫態循環下不同油品及後處理設備五種測試條件之次微米微粒

數量加權排放係數與減量效率(以 B1\_S50 為基準)

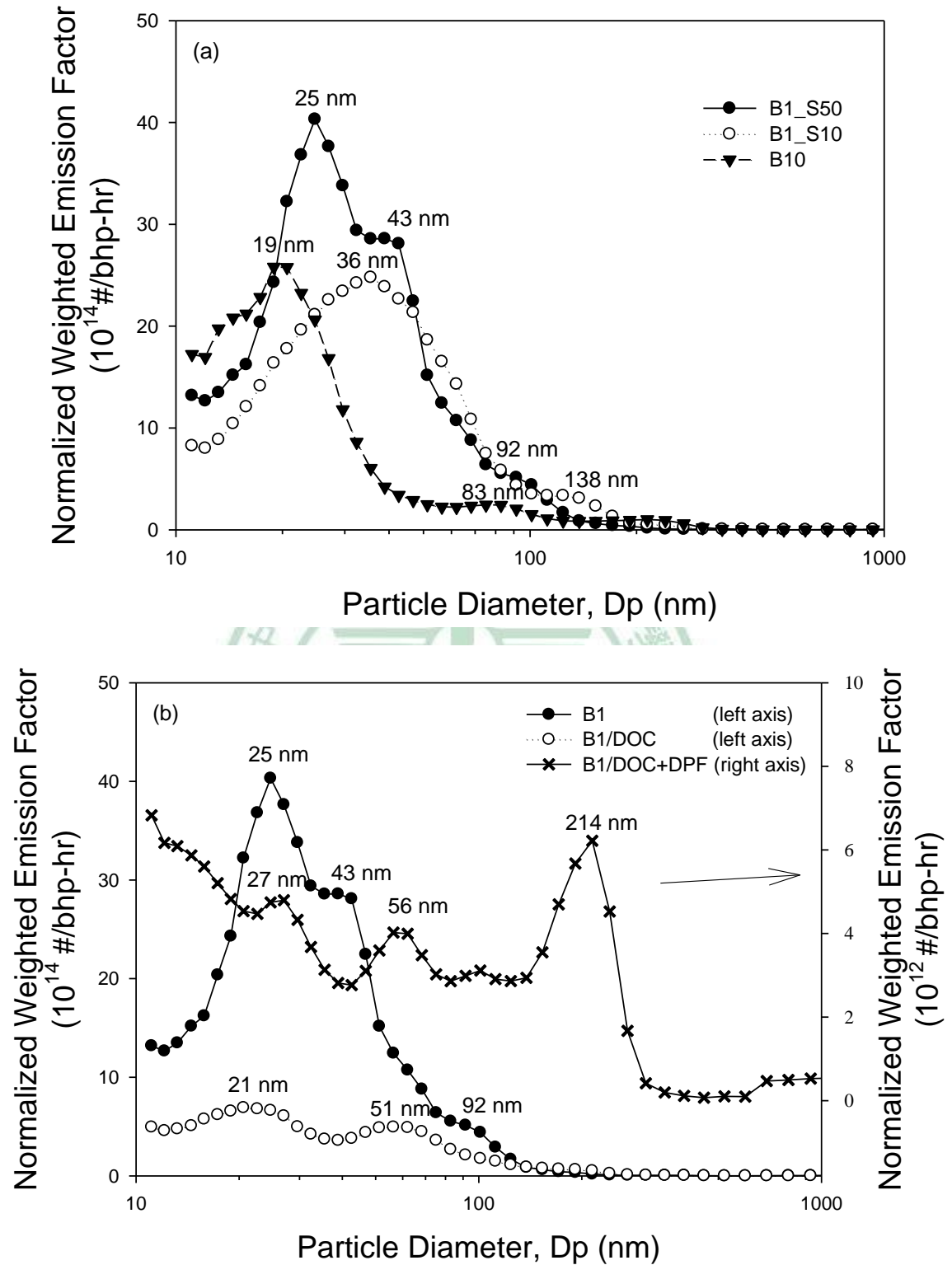


圖 4-31 暫態循環下五種測試條件之次微米微粒數量排放係數粒徑分布：

(a)使用不同油品；(b)加裝尾氣後處理設備；B1+DPF 因排放係數遠低於

其他操作條件，故其座標另置於右方縱軸

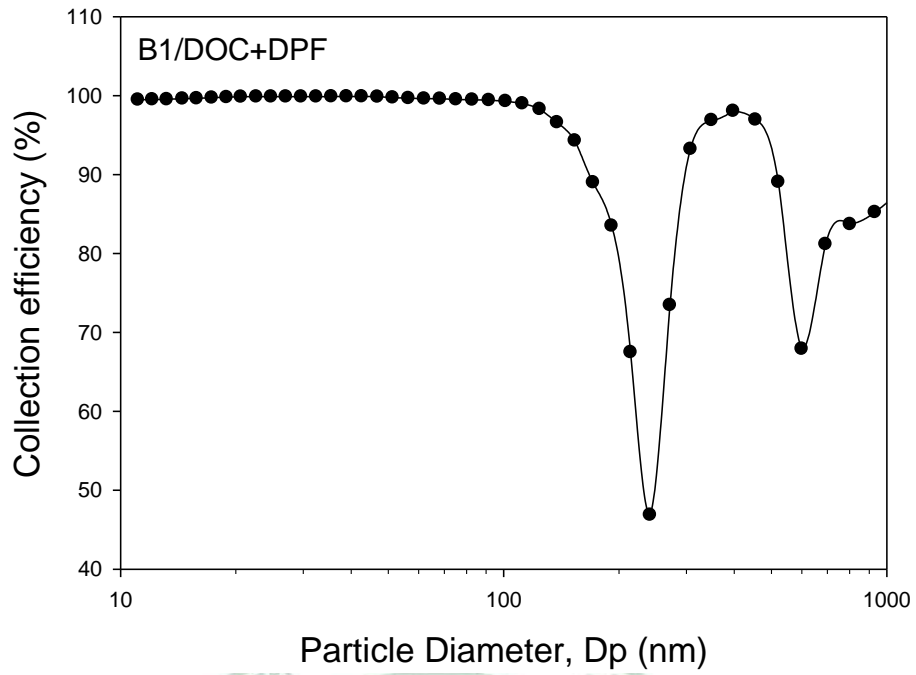


圖 4-32 氧化觸媒濾煙器於暫態循環中對不同粒徑微粒之補集效率



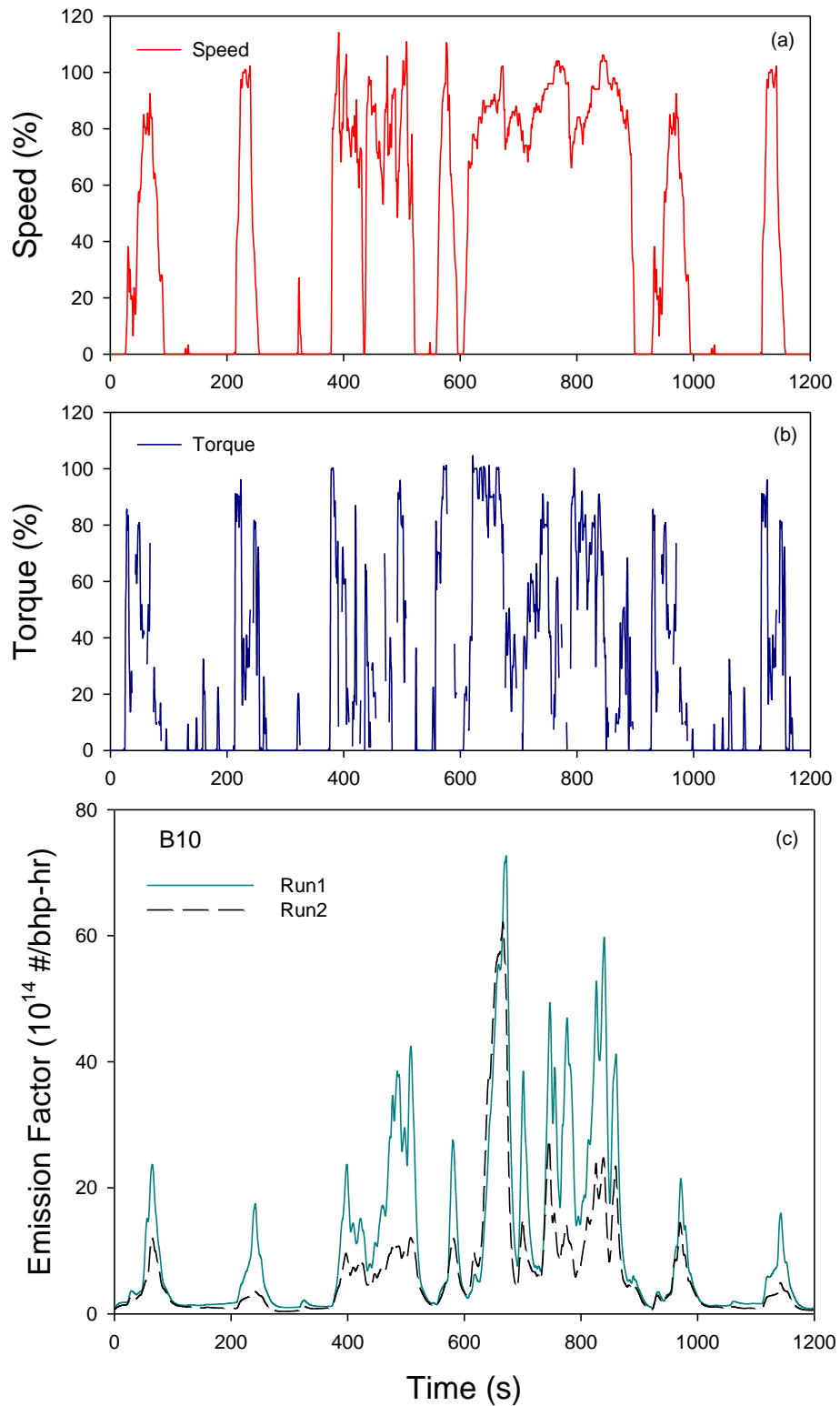


圖 4-33 美國暫態循環逐秒運轉型態與使用 B10 生質柴油所排放之數量  
 排放係數 (a)FTP 1200 秒運轉速度百分比 (b)FTP 1200 秒運轉扭力百分  
 比 (c)使用 B10 逐秒所排放之數量排放係數

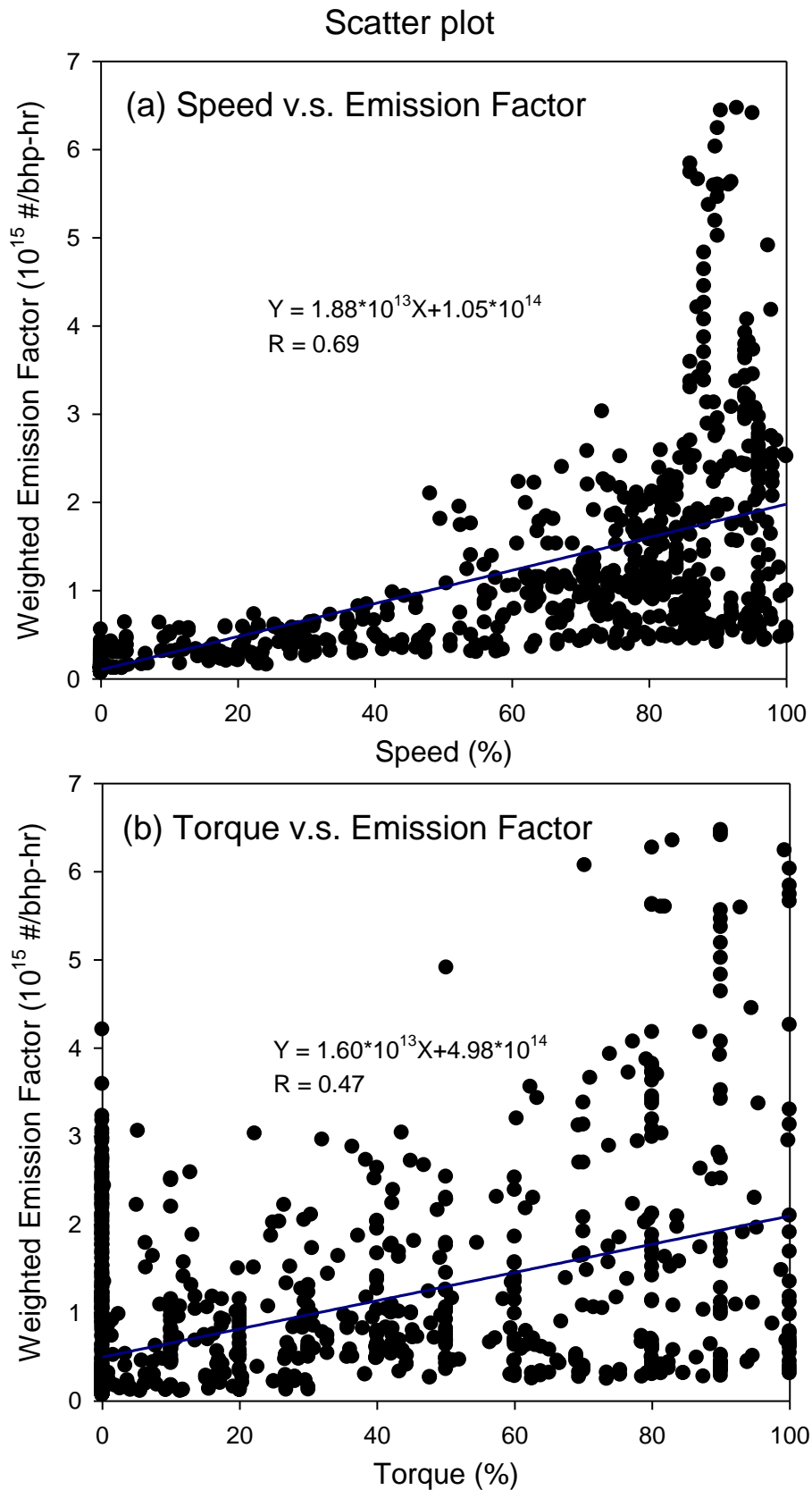


圖 4-34 美國暫態循環逐運轉型態與所排放之微粒數量排放係數相關係

數分布圖 (a) 速度與排放係數 (b) 扭力與排放係數

## 第五章 結論

### 5.1 研究結論

本研究使用重型柴油引擎於動力計操作下，分別進行穩態與暫態循環測試，以探討不同引擎操作條件、油品與尾氣後處理設備，對重型柴油引擎尾氣中次微米懸浮微粒數量濃度粒徑分布與減量效率之影響，主要研究結論分列於下：

1. 半揮發性物質對柴油引擎在 0% 負載時之微粒數量濃度粒徑分布特性有很大影響。樣本未加熱前，尾氣中微粒數量濃度較高且微粒粒徑大；樣本加熱後微粒數量濃度減少且粒徑變小。反觀高負載(> 25%)時，無論加熱與否其數量濃度僅有些微之減少且粒徑分布不變。此差異主要是因為低負載時所排放之廢氣富含揮發性物質，故冷卻(未加熱)後凝結於微粒表面上並似乎促使核化作用之發生。然而，高負載時所排放之廢氣含有甚少之揮發性物質，因此經過加熱後對微粒濃度與粒徑無甚影響。
2. 排除揮發性物質對 0% 負載微粒特性影響外。其餘引擎操作條件尾氣中微粒數量濃度隨負載與轉速增加而增高，且微粒數量濃度粒徑分布呈單峰分布(unimodal)，並隨負載增加粒徑增大，但隨轉速增加粒徑變小。此外，前述趨勢並不受油品影響。



3. 在相同負載下，相較於市售低硫柴油，生質柴油之減量效率隨廢食用油添加比例增加而增高，亦即微粒數量濃度排放越低，而超低硫柴油亦有相當程度之減量效率。然而，使用生質柴油與超低硫柴油對微粒數量濃度粒徑分布則無明顯影響。
4. 不論何種負載與油品，裝設 DPF 與 DOC+DPF 對於引擎尾氣中數量濃度均有 99% 以上之減量效率；粒徑分布方面，除了在 200-800 nm 粒徑範圍，其餘各粒徑之微粒減量效果都高達 99.6% 以上，故引擎尾氣在經過濾煙器，其微粒粒徑分布無顯著變化。
5. 重型柴油引擎在穩態操作下，其尾氣中微粒數量濃度範圍在  $10^7 - 10^8$  #/cm<sup>3</sup>，與相關文獻相當，且高於大氣環境微粒數量濃度約 1000 倍。暫態循環下，其微粒數量排放係數約  $10^{15}$  #/bhp-hr (#/km)，此值雖高於歐洲重型柴油數量排放標準( $10^{14}$  #/km)，但在裝設 DOC+DPF 後即落在該標準內。暫態循環由於包含多種引擎運轉型態，因此在粒徑分布上呈多峰分布。

## 5.2 研究限制

1. 於穩態測試中，本研究參考聯合國-歐盟微粒數量採樣方法，對樣本進行加熱以去除揮發性物質之影響，其只針對固態微粒進行探討，較不符合實際大氣環境下引擎排放情形。

2. 歐洲穩態採樣只針對 3 種模式進行測試，占總循環條件 35% 權重，所以無法反應總行車型態之各種行車條件。
3. 本研究乃針對 10-1000 nm 範圍之次微米懸浮微粒徑進行探討，然而相關研究指出引擎尾氣中存有相當比例粒徑  $< 10$  nm 之凝核峰微粒，因此會低估此範圍之微粒。

### 5.3 建議

1. 本研究顯示單純的油品改善，如超低硫與生質柴油，即有 8-51% 之微粒數量減量效率。依我國現行之超低硫 B2 生質柴油，建議在可行之範圍內持續提高生質柴油含量比例，進一步提升微粒減量成效。
2. 本研究指出引擎惰轉、高負載與高轉速時，其微粒數量排放濃度與係數相對較高；此外，惰轉時廢氣中更含大量之揮發性物質。有鑑於此，建議交通規畫與管理應盡可能減少此類引擎運轉型態之發生。
3. 本研究測試之國內自製氧化觸媒濾煙器，在多種引擎運轉與油品測試下，皆能對尾氣中微粒數量濃度有 99% 以上減量效果，相當或優於國外之氧化觸媒濾煙器。惟氧化觸媒濾煙器之實際廣泛推廣，仍有賴有效且經濟之再生程序，故建議對此程序衍生之微粒排放特性應該進一步探討。
4. 本研究顯示氧化觸媒濾煙器後之微粒數量濃度非常低，相當於大氣既

存微粒濃度，故對懸浮微粒減量將有極大助益。然而，若不同時對揮發性物質進行減量，預期仍有半揮發性微粒之問題。因此，建議持續探討揮發性物質對微粒數量排放特性之影響。

5. 本研究所採行之聯合國-歐盟微粒數量量測方法顯示，引擎尾氣固態微粒數量濃度粒徑分布量測再現性良好，可輔助現行微粒質量分析法，以因應逐年加嚴之排放標準。然而，承如前述，建議不能忽略尾氣中揮發性物質之影響，以掌握民眾與勞工之暴露實態。再者，引擎尾氣微粒特性受  $< 10 \text{ nm}$  之凝核峰微粒影響，因此建議應進一步針對這些微粒進行瞭解。



## 參考文獻

- Abdul-Khalek, I.S., Kittelson, D. & Brear, F. (2000). Nanoparticle growth during dilution and cooling of diesel exhaust: Experimental investigation and theoretical assessment. *Society of Automotive Engineers (SAE) Technical Paper* No. 01, pp. 0515.
- Abdul-Khalek, I.S., Kittelson, D.B. & Brear, F. (1998). Diesel trap performance: Particle size measurements and trends. *Society of Automotive Engineers (SAE) Technical Paper* pp. 982599.
- Abthoff, J. (1985). The regenerable trap oxidizer - an emission control technique for diesel engines. *SAE Technical Paper*, pp. 850015.
- Abu-Qudais, M., Matson, A. & Kittelson, D. (2001). Combination of methods for characterization diesel engine exhaust particulate emissions. *Jsm International Journal*, Vol. 44, No. 1, pp. 166-170.
- Bagley, S.T., Gratz, L.D., Johnson, J.H. & McDonald, J.F. (1998). Effects of an oxidation catalytic converter and a biodiesel fuel on the chemical, mutagenic, and particle size characteristics of emissions from a diesel engine. *Environmental Science & Technology*, Vol. 32, No. 9, pp. 1183-1191.
- Balmes, J.R., Fine, J.M. & Sheppard, D. (1987). Symptomatic bronchoconstriction after short-term inhalation of sulfur dioxide. *American Review of Respiratory Disease*, Vol. 136, No. 5, pp. 1117-21.
- Bardasz, E.A., Antoon, F. A., Schiferl, E. A., Wang, J. C., & Totten, W. (2004). The impact of lubricant and fuel derived sulfur species on efficiency and durability of diesel NOx adsorbers. *SAE Technical Paper*, Vol. 113, pp. 1917-1924.
- Beddows, D.C.S. & Harrison, R.M. (2008). Comparison of average particle number emission factors for heavy and light duty vehicles derived from rolling chassis dynamometer and field studies. *Atmospheric Environment*, Vol. 42, No. 34, pp. 7954-7966.
- Boffetta, P., Jourenkova, N. & Gustavsson, P. (1997). Cancer risk from occupational and environmental exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons. *Cancer Causes Control*, Vol. 8, No. 3, pp. 444-72.
- Brunekreef, B. & Holgate, S.T. (2002). Air pollution and health. *Lancet*, Vol. 360, No. 9341, pp. 1233-42.
- California EPA, C.E.P.A. (1998). Health risk assessment for diesel exhaust. Public and scientific review panel review draft. *Public and Scientific*



*Review Panel Review Draft. Office of Environmental Health Hazard Assessment.*

- Canakci, M. (2007). Combustion characteristics of a turbocharged DI compression ignition engine fueled with petroleum diesel fuels and biodiesel. *Bioresource Technology*, Vol. 98, No. 6, pp. 1167-1175.
- Dalton, T.P., Kerzee, J.K., Wang, B., Miller, M., Dieter, M.Z., Lorenz, J.N., Shertzer, H.G., Nerbert, D.W. & Puga, A. (2001). Dioxin exposure is an environmental risk factor for ischemic heart disease. *Cardiovascular Toxicology*, Vol. 1, pp. 285-298.
- Di, Y.G., Cheung, C.S. & Huang, Z.H. (2009). Comparison of the effect of biodiesel-diesel and ethanol-diesel on the particulate emissions of a direct injection diesel engine. *Aerosol Science and Technology*, Vol. 43, No. 5, pp. 455-465.
- Dockery, D.W., Luttmann-Gibson, H., Rich, D.Q., Link, M.S., Mittleman, M.A., Gold, D.R., Koutrakis, P., Schwartz, J.D. & Verrier, R.L. (2005). Association of air pollution with increased incidence of ventricular tachyarrhythmias recorded by implanted cardioverter defibrillators. *Environmental Health Perspectives*, Vol. 113, No. 6, pp. 670-674.
- EEA, European Environment Agency (2009). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2009. EEA, No. Copenhagen.
- Elder, A.C., Gelein, R., Azadniv, M., Frampton, M., Finkelstein, J. & Oberdorster, G. (2004). Systemic effects of inhaled ultrafine particles in two compromised, aged rat strains. *Inhalation Toxicology*, Vol. 16, No. 6-7, pp. 461-71.
- Filippo, A.D. & Maricq, M.M. (2008). Diesel nucleation mode particles: semivolatile or solid? *Environmental Science & Technology*, Vol. 42, No. 21, pp. 7957-7962.
- Fontaras, G., Samaras, Z., Kousoulidou, M., Karavalakis, G., Tzamkiozis, T., Pistikopoulos, P., Ntziachristos, L., Bakeas, E. & Stournas, S. (2010). Effects of low concentration biodiesel blend application on modern passenger cars. Part 1: Feedstock impact on regulated pollutants, fuel consumption and particle emissions. *Environmental Pollution*, Vol. 158, No. 5, pp. 1451-1460.
- Frank, B.P., Tang, S., Lanni, T., Grygas, J., Rideout, G., Meyer, N. & Beregszaszy, C. (2007). The effect of fuel type and aftertreatment method on ultrafine particle emissions from a heavy-duty diesel engine. *Aerosol Science and Technology*, Vol. 41, No. 11, pp. 1029-1039.

- Grose, M., Sakurai, H., Savstrom, J., Stolzenburg, M.R., Watts, W.F., Morgan, C.G., Murray, I.P., Twigg, M.V., Kittelson, D.B. & McMurry, P.H. (2006). Chemical and physical properties of ultrafine diesel exhaust particles sampled downstream of a catalytic trap. *Environmental Science & Technology*, Vol. 40, No. 17, pp. 5502-5507.
- Gustavsson, P., Jakobsson, R., Nyberg, F., Pershagen, G., Jarup, L. & Scheele, P. (2000). Occupational exposure and lung cancer risk: A population-based case-referent study in Sweden. *American Journal of Epidemiology*, Vol. 152, No. 1, pp. 32-40.
- Heikkila, J., Virtanen, A., Ronkko, T., Keskinen, J., Aakko-Saksa, P. & Murtonen, T. (2009). Nanoparticle emissions from a heavy-duty engine running on alternative diesel fuels. *Environmental Science & Technology*, Vol. 43, No. 24, pp. 9501-9506.
- IARC, I.A.f.R.o.C. (1986). Diesel and gasoline engine exhausts and some nitroarenes. *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*, Vol. 46.
- Jones, A.M. & Harrison, R.M. (2006). Estimation of the emission factors of particle number and mass fractions from traffic at a site where mean vehicle speeds vary over short distances. *Atmospheric Environment*, Vol. 40, No. 37, pp. 7125-7137.
- Jung, H. & Kittelson, D.B. (2005). Measurement of electrical charge on diesel particles. *Aerosol Science and Technology*, Vol. 39, No. 12, pp. 1129-1135.
- Jung, H., Kittelson, D.B. & Zachariah, M.R. (2006). Characteristics of SME biodiesel-fueled diesel particle emissions and the kinetics of oxidation. *Environmental Science & Technology*, Vol. 40, No. 16, pp. 4949-4955.
- Kagawa, J. (2001). Health effects of diesel exhaust emissions - a mixture of air pollutants of worldwide concern. *Toxicology*, Vol. 164, No. 1-3, pp. 27-27.
- Kampa, M. & Castanas, E. (2008). Human health effects of air pollution. *Environmental Pollution*, Vol. 151, No. 2, pp. 362-367.
- Keogh, D.U., Kelly, J., Mengersen, K., Jayaratne, R., Ferreira, L. & Morawska, L. (2009). Derivation of motor vehicle tailpipe particle emission factors suitable for modelling urban fleet emissions and air quality assessments. *Environmental science and pollution research international*, Vol. 17, No. 3, pp. 724-39.
- Kim, H. & Choi, B. (2010). The effect of biodiesel and bioethanol blended diesel fuel on nanoparticles and exhaust emissions from CRDI diesel



- engine. *Renewable Energy*, Vol. 35, No. 1, pp. 157-163.
- Kittelson, D.B., Watts, W.F. & Johnson, J.P. (2004). Nanoparticle emissions on Minnesota highways. *Atmospheric Environment*, Vol. 38, No. 1, pp. 9-19.
- Kittelson, D.B., Watts, W.F. & Johnson, J.P. (2006). On-road and laboratory evaluation of combustion aerosols - Part 1: Summary of diesel engine results. *Journal of Aerosol Science*, Vol. 37, No. 8, pp. 913-930.
- Lapuerta, M., Armas, O., Ballesteros, R. & Fernandez, J. (2005). Diesel emissions from biofuels derived from Spanish potential vegetable oils. *Fuel*, Vol. 84, No. 6, pp. 773-780.
- Lapuerta, M., Armas, O. & Rodriguez-Fernandez, J. (2008a). Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 34, No. 2, pp. 198-223.
- Lapuerta, M., Fernandez, J.R. & Agudelo, J.R. (2008b). Diesel particulate emissions from used cooking oil biodiesel. *Bioresource Technology*, Vol. 99, No. 4, pp. 731-740.
- Lapuerta, M., Martos, F.J. & Herreros, J.M. (2007). Effect of engine operating conditions on the size of primary particles composing diesel soot agglomerates. *Journal of Aerosol Science*, Vol. 38, No. 4, pp. 455-466.
- Lehmann, U., Mohr, M., Schweizer, T. & Rutter, J. (2003). Number size distribution of particulate emissions of heavy-duty engines in real world test cycles. *Atmospheric Environment*, Vol. 37, No. 37, pp. 5247-5259.
- Majewski, W.A. (2010). Diesel oxidation catalyst. *Guide, D.T.*  
[www.DieselNet.com](http://www.DieselNet.com). Copyright © Ecopoint Inc. Revision 2010.04a,  
[http://www.dieselnet.com/tech/cat\\_doc.html](http://www.dieselnet.com/tech/cat_doc.html) Accessed on 06/01/2011
- Mandal, P.K. (2005). Dioxin: a review of its environmental effects and its aryl hydrocarbon receptor biology. *Journal of Comparative Physiology B: Biochemical, Systemic, and Environmental Physiology*, Vol. 175, No. 4, pp. 221-30.
- Maricq, M.M. (2007). Chemical characterization of particulate emissions from diesel engines: A review. *Journal of Aerosol Science*, Vol. 38, No. 11, pp. 1079-1118.
- Moh'd Abu-Qudais, Andreas Matson & Kittelson, D. (2001). Combination of methods for characterization diesel engine exhaust particulate emissions. *Jsme International Journal Series B-Fluids and Thermal Engineering*, Vol. 44, No. 1.

- Mohr, M., Forss, A.M. & Lehmann, U. (2006). Particle emissions from diesel passenger cars equipped with a particle trap in comparison to other technologies. *Environmental Science & Technology*, Vol. 40, No. 7, pp. 2375-2383.
- Morawska, L., Bofinger, N.D., Kocis, L. & Nwankwoala, A. (1998). Submicrometer and supermicrometer particles from diesel vehicle emissions. *Environmental Science & Technology*, Vol. 32, No. 14, pp. 2033-2042.
- Mueller, C.J., Pickett, L.M., Pitz, W.J., Siebers, D.L., Westbrook, G.K. & Martin, G.C. (2003). Effects of oxygenates on soot processes in DI diesel engines: experiments and numerical simulations. *SAE Technical Paper*, Vol. 1, pp. 1791.
- Nauss, K. (1997). Diesel exhaust: A critical analysis of emissions, exposure, and health effects. *Health Effects Institute (HEI)*, <http://www.dieselnet.com/papers/9710nauss.html> Accessed on 06/01/2011
- Neer, A. & Koylu, U.O. (2006). Effect of operating conditions on the size, morphology, and concentration of submicrometer particulates emitted from a diesel engine. *Combustion and Flame*, Vol. 146, No. 1-2, pp. 142-154.
- Nel, A., Xia, T., Madler, L. & Li, N. (2006). Toxic potential of materials at the nanolevel. *Science*, Vol. 311, No. 5761, pp. 622-627.
- Nemmar, A., Hoylaerts, M.F., Hoet, P.H.M., Dinsdale, D., Smith, T., Xu, H.Y., Vermylen, J. & Nemery, B. (2002). Ultrafine particles affect experimental thrombosis in an in vivo hamster model. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, Vol. 166, No. 7, pp. 998-1004.
- Ning, Z., Cheung, C.S. & Liu, S.X. (2004). Experimental investigation of the effect of exhaust gas cooling on diesel particulate. *Journal of Aerosol Science*, Vol. 35, No. 3, pp. 333-345.
- Oberdorster, G., Oberdorster, E. & Oberdorster, J. (2005). Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environ Health Perspect*, Vol. 113, No. 7, pp. 823-39.
- Pagan, J. (1999). Study of particle size distributions emitted by a diesel engine. *SAE Technical Paper*, Vol. 1, pp. 1141.
- Park, K., Kittelson, D.B. & McMurry, P.H. (2003). A closure study of aerosol mass concentration measurements: comparison of values obtained with filters and by direct measurements of mass distributions.

- Atmospheric Environment*, Vol. 37, No. 9-10, pp. 1223-1230.
- Perry, R.H. (1984). Perry's chemical engineers' handbook. *McGraw-Hill*.
- Peters, A., Wichmann, H.E., Tuch, T., Heinrich, J. & Heyder, J. (1997). Respiratory effects are associated with the number of ultrafine particles. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* Vol. 155, No. 4, pp. 1376-83.
- Ronkko, T., Keskinen, J., Virtanen, A., Kannosto, J., Lappi, M. & Pirjola, L. (2007). Nucleation mode particles with a nonvolatile core in the exhaust of a heavy duty diesel vehicle. *Environmental Science & Technology*, Vol. 41, No. 18, pp. 6384-6389.
- Schneider, J., Hock, N., Weimer, S. & Borrmann, S. (2005). Nucleation particles in diesel exhaust: Composition inferred from in situ mass spectrometric analysis. *Environmental Science & Technology*, Vol. 39, No. 16, pp. 6153-6161.
- Schröder, O., Krahl, J., Munack, A. & Bunger, J. (1999). Environmental and health effects caused by the use of biodiesel. *SAE Technical Paper*, Vol. 1, No. 3561.
- Schumachera, L.G., Borgelta, S.C., Fosseeb, D., Goetz, W. & Hires, W.G. (1996). Heavy-duty engine exhaust emission tests using methyl ester soybean oil/diesel fuel blends *Bioresource Technology*, Vol. 57, No. 1, pp. 31-36.
- Schwartz, J. (1994). Air pollution and daily mortality: a review and meta analysis. *Environmental Research* Vol. 64, No. 1, pp. 36-52.
- Seaton, A., MacNee, W., Donaldson, K. & Godden, D. (1995). Particulate air pollution and acute health effects. *Lancet*, Vol. 345, No. 8943, pp. 176-8.
- Shi, J.P. & Harrison, R.M. (1999). Investigation of ultrafine particle formation during diesel exhaust dilution. *Environmental Science & Technology*, Vol. 33, No. 21, pp. 3730-3736.
- Shibata, K., Yanagisawa, N., Tashiro, Y., Mukunashi, T., Onodera, T. & Sakamoto, K. (2010). Reduction in the emissions and toxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons from a heavy-duty diesel engine with the latest aftertreatment devices. *Journal of Health Science*, Vol. 56, No. 1, pp. 31-40.
- Sydbom, A., Blomberg, A., Parnia, S., Stenfors, N., Sandstrom, T. & Dahlen, S.E. (2001). Health effects of diesel exhaust emissions. *European Respiratory Journal*, Vol. 17, No. 4, pp. 733-746.
- Tager, I.B., Balmes, J., Lurmann, F., Ngo, L., Alcorn, S. & Kunzli, N. (2005).

- Chronic exposure to ambient ozone and lung function in young adults. *Epidemiology*, Vol. 16, No. 6, pp. 751-9.
- Tobias, H.J., Beving, D.E., Ziemann, P.J., Sakurai, H., Zuk, M., McMurry, P.H., Zarling, D., Waytulonis, R. & Kittelson, D.B. (2001). Chemical analysis of diesel engine nanoparticles using a nano-DMA/thermal desorption particle beam mass spectrometer. *Environmental Science & Technology*, Vol. 35, No. 11, pp. 2233-2243.
- Tsolakis, A. (2006). Effects on particle size distribution from the diesel engine operating on RME-biodiesel with EGR. *Energy & Fuels*, Vol. 20, No. 4, pp. 1418-1424.
- TW EPA, Environmental Protection Administration Executive Tuen, R.O.C. (Taiwan) (2010a). TEDS7.0 版 (96 年基準年排放量). 空氣污染排放量查詢系統.
- TW EPA, Environmental Protection Administration Executive Tuen, R.O.C. (Taiwan) (2010b). 柴油含硫量管制. 行政院環境保護署移動式污染源管制網.
- Tzankiozis, T., Ntziachristos, L., Mamakos, A., Fontaras, G. & Samaras, Z. (2011). Aerodynamic and mobility size distribution measurements to reveal biodiesel effects on diesel exhaust aerosol. *Aerosol Science and Technology*, Vol. 45, No. 5, pp. 587-595.
- US EPA, E.P.A. (2002). Health assessment document for diesel engine exhaust. *US Environmental Protection Agency*, No. Washington, DC.
- Uysal, N. & Schapira, R.M. (2003). Effects of ozone on lung function and lung diseases. *Curr Opin Pulm Med*, Vol. 9, No. 2, pp. 144-50.
- Vaaraslahti, K., Virtanen, A., Ristimäki, J. & Keskinen, J. (2004). Nucleation mode formation in heavy-duty diesel exhaust with and without a particulate filter. *Environmental Science & Technology*, Vol. 38, No. 18, pp. 4884-4890.
- Vermylen, J., Nemmar, A., Nemery, B. & Hoylaerts, M.F. (2005). Ambient air pollution and acute myocardial infarction. *Journal of Thrombosis and Haemostasis*, Vol. 3, No. 9, pp. 1955-61.
- Virtanen, A.K.K., Ristimäki, J.M., Vaaraslahti, K.M. & Keskinen, J. (2004). Effect of engine load on diesel soot particles. *Environmental Science and Technology*, Vol. 38, No. 9, pp. 2551-2556.
- Wang, J., Storey, J., Domingo, N., Huff, S., Thomas, J. & West, B. (2006). Studies of diesel engine particle emissions during transient operations using an engine exhaust particle sizer. *Aerosol Science and Technology*, Vol. 40, No. 11, pp. 1002-1015.



- Wegmann, M., Fehrenbach, A., Heimann, S., Fehrenbach, H., Renz, H., Garn, H. & Herz, U. (2005). NO<sub>2</sub>-induced airway inflammation is associated with progressive airflow limitation and development of emphysema-like lesions in C57bl/6 mice. *Experimental and Toxicologic Pathology* Vol. 56, No. 6, pp. 341-50.
- Westbrook, C.K., Pitz, W.J. & Curran, H.J. (2006). Chemical kinetic modeling study of the effects of oxygenated hydrocarbons on soot emissions from diesel engines. *Journal of Physical Chemistry A*, Vol. 110, No. 21, pp. 6912-6922.
- Whitby, K.T. & Cantrell, B.K. (1976). Atmospheric aerosols: characteristics and measurement. *Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE)*.
- Witschger, O. & Fabriès, J. (2005). Particules ultra-fines et santé au travail 1- caractéristiques et effets potentiels sur la santé. *INRS - Hygiène et sécurité du travail - Cahiers de notes documentaires - 2<sup>e</sup> trimestre 2005*, No. 199, pp. 21-35.
- Wong, C.P., Chan, T.L. & Leung, C.W. (2003). Characterisation of diesel exhaust particle number and size distributions using mini-dilution tunnel and ejector-diluter measurement techniques. *Atmospheric Environment*, Vol. 37, No. 31, pp. 4435-4446.
- Xue, J.L., Grift, T.E. & Hansen, A.C. (2011). Effect of biodiesel on engine performances and emissions. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 2, pp. 1098-1116.
- Zhang, K.M., Wang, X., Westerdahl, D., Wu, Y. & Pan, X.C. (2011). On-road emission factor distributions of individual diesel vehicles in and around Beijing, China. *Atmospheric Environment*, Vol. 45, No. 2, pp. 503-513.
- Zhou, Y.M., Zhong, C.Y., Kennedy, I.M., Leppert, V.J. & Pinkerton, K.E. (2003). Oxidative stress and NFκB activation in the lungs of rats: a synergistic interaction between soot and iron particles. *Toxicology and Applied Pharmacology* Vol. 190, No. 2, pp. 157-69.
- Zhu, J.Y., Lee, K.O., Yozgatligil, A. & Choi, M.Y. (2005). Effects of engine operating conditions on morphology, microstructure, and fractal geometry of light-duty diesel engine particulates. *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30, pp. 2781-2789.
- Zhu, L., Cheung, C.S., Zhang, W.G. & Huang, Z. (2010). Emissions characteristics of a diesel engine operating on biodiesel and biodiesel blended with ethanol and methanol. *Science of Total Environment*, Vol.

- 408, pp. 914-921.
- Zhu, Y.F., Hinds, W.C., Kim, S., Shen, S. & Sioutas, C. (2002a). Study of ultrafine particles near a major highway with heavy-duty diesel traffic. *Atmospheric Environment*, Vol. 36, No. 27, pp. 4323-4335.
- Zhu, Y.F., Hinds, W.C., Kim, S. & Sioutas, C. (2002b). Concentration and size distribution of ultrafine particles near a major highway. *Journal of the Air & Waste Management Association*, Vol. 52, No. 9, pp. 1032-1042.
- 交通部 (2011). 機動車輛登記數. 交通統計,  
<http://www.motc.gov.tw/mocwebGIP/wSite/lp?ctNode=162&CtUnit=94&BaseDSD=16&mp=1> Accessed on 06/01/2011
- 吳澤松, 陳君維, 張財源, 馬宗延, 許創欽 & 林淑聯 (2005). 生質柴油之引擎及實車測試分析. 中國機械工程學會第二十二屆全國學術研討會論文集.
- 張瑋玲 (2005). 堆高機及汽車柴油引擎微粒心血管毒性之比較. 國立台灣大學職業醫學與工業衛生研究所碩士論文.
- 王顛婷 (2009). 台灣中部空品區秋冬期間之大氣超細微粒數量濃度粒徑分布及排放源研究. 中國醫藥大學職業安全與衛生學系暨碩士班碩士論文.
- 經濟部能源局 (2010). 中華民國 98 年能源統計手冊. 經濟部能源局.
- 莊志偉 (2005). 柴油車搭載觸媒濾煙器效能探討. 國立中興大學機械工程研究所碩士論文.
- 陳勳融 (2011). 加裝濾煙器重型柴油引擎排放為利物化特性. 國立中興大學環境工程學系碩士論文.
- 行政院主計處 (2011). 人口數及人口增加率. 全國統計資料人口靜態統計,  
<http://www.dgbas.gov.tw/ct.asp?xItem=15408&CtNode=4594&mp=1>  
Accessed on 06/01/2011



中國醫藥大學公共衛生學院 100 學年度職安系碩士班畢業論文審查意見紀錄

指導教授：楊禮豪、賴俊雄

學生：劉怡均

論文題目：不同控制技術下重型柴油引擎尾氣中次微米懸浮微粒之數量排放特性與減量效率

審查委員意見

修正後

委員一：鄭曼婷

論文嚴謹。柴油引擎數據提供排放因子及管制策略所需的資料，對空氣污染管制和風險評估有益。

委員一：

謝謝委員肯定。

委員二：賴全裕

1. 建議提供 A/F ratio。
2. 建議列出燃燒之化學當量比。
3. P.180, Fig4-28 之 error bar 似乎過大。

委員二：

1. 謝謝委員意見。本團隊中興大學機械系提供於 0%、25% 和 50% 負載下之空燃比分別為 247、64 和 35(詳見 p.60)。
2. 柴油引擎在燃燒特性上與汽油引擎相距甚遠，且柴油化學特性複雜，其空燃比範圍 19.5-200，若假設柴油為  $C_{12}H_{22}$ ，完全燃燒之空燃比為 14.7。本研究之 0%、25% 和 50% 之化學當量比( $\alpha$ )分別為 17、4.4 和 2.4，均屬於燃料稀薄狀態，故污染物之生成可能主要受到引擎燃燒溫度之影響(參見表 3-7，p.86)。
3. 謝謝委員，以更正詳見 p.181，圖 4-29。

委員三：賴俊雄

1. 添加生質柴油及低硫柴油多少對尾氣排放會最低?
2. 結果與討論中，對數據之呈現較多，應加以說明其原因?

委員三：

1. 單就污染物排放而言，使用生質柴油除了對  $NO_x$  有增量外，其餘 90% 以上研究顯示 PM、THC、CO 和微粒數量都呈現添加越多減量也越高之趨勢；然而，使用生質柴油仍需考量引擎適用性，且研究顯示使用生質柴油在全負載時會降低引擎馬力，並且增加油耗，因此對於生質

<p>委員四：楊禮豪</p> <p>此論文內容極為豐富，可供未來柴油引擎微粒管制參考；以下有幾點建議：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 請依照口委意見進行論文修改或補充；</li> <li>2. 內文仍有許多錯字與格式問題，請更正；</li> <li>3. 微粒數量研究結果可嘗試與相關之質量結果進行比較</li> </ol> <p>最後，對於已將部分研究成果投稿至國際期刊，深表肯定。</p>	<p>柴油尚需對引擎方面進一步考量。低硫柴油依照目前國內政策，含硫量已小於 10 ppm，就污染物而言也具有相當減量效果，研究顯示含硫量 26 ppm 之微粒數量排放已相當於 1 ppm，因此對於國內目前柴油含硫量，已達可接受範圍(詳見 p.26)。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>2. 已於結果與討論中增加原因討論之說明。</li> </ol> <p>委員四：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 2. 謝謝委員意見。已進行修正。</li> <li>3. 謝謝委員建議，已與團隊中質量結果進行比較，質量結果大致與數量具有相同之趨勢，詳見 p.108、139 與 145。</li> </ol>
<p>論文口試日期： 100 年 06 月 27 日</p>	